

# **Lazer Kristalizasyon Yöntemi ile Yüksek Verimli İnce Film Kristal Si Güneş Gözesi Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 1003**

**Proje No: 115M061-062-063**

Proje Yöneticisi:

**Doç. Dr. Alpan BEK**

Yürütücüler:

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit YILMAZ (25 ay)

Prof. Dr. Oğuz DOĞAN (11 ay)

Semih Koray EKEN

Araştırmacılar:

Doç. Dr. Hande Toffoli

Volkan TÜRKER

Danışman:

Prof. Dr. Raşit TURAN

## ÖNSÖZ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Doç. Dr. Alpan Bek yöneticiliğinde, Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi'nden Dr. Öğr. Üyesi Mücahit Yılmaz ve FiberLAST A. Ş.'den Semih Koray Eken yürütücülüklerinde, Doç. Dr. Hande Toffoli'nin araştırmacı, Prof. Dr. Raşit Turan'ın danışman olarak yer aldıkları proje Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (GÜNAM), Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü ve FiberLAST A. Ş.'de 01/12/2015 - 01/12/2018 tarihleri arasında 36 ay boyunca ortak olarak yürütülmüş olup 115M061, 115M062 ve 115M063 proje numaralarıyla TÜBİTAK ARDEB 1003 programı tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ.....</b>	<b>2</b>
<b>3. GEREÇLER.....</b>	<b>12</b>
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>14</b>
4.1. İNCE FILM KATMANLARININ ÜRETİMİ .....	14
4.2. İNCE FILMLERİN LAZER İLE KRISTALLENDİRİLMESİ .....	23
4.2.1. PECVD ile Büyütülmüş a-Si Katmanlar .....	23
4.2.2. E-beam Buharlaştırma ile Büyütülmüş a-Si Katmanlar .....	26
4.2.3. Farklı Dielektrik Ara Katmanların Lazer Kristallendirmeye olan Etkileri .....	30
4.3. FOTOVOLTAİK GÖZE YAPILARI .....	34
4.3.1. Homoeklem Aygıt Yapıları .....	34
4.3.2. Heteroeklem Aygıt Yapıları.....	41
4.4. LAZER TARAMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ.....	46
4.5. KURUMSAL MODELLEME VE HESAPLAMALAR .....	72
<b>5. TARTIŞMA/SONUÇ .....</b>	<b>78</b>
5.1. İŞ PAKETLERİ SONUÇLAARININ ANALİZİ VE BAŞARI KRİTERLERİYLE KARŞILAŞTIRMALARI.....	78
5.2. PROJE GENELİ .....	80

## TABLO LİSTELERİ

<b>Tablo 4.1. <math>\text{SiN}_x</math> örneklerinin üretim parametreleri.....</b>	<b>17</b>
<b>Tablo 4.2. Sinyal Diyotunun Atım Modülasyon Parametreleri.....</b>	<b>51</b>
<b>Tablo 4.3. Fiber lazerin çıkışından elde edilen lazer parametreleri.....</b>	<b>56</b>
<b>Tablo 4.4. Harmonik üretimi ile elde edilen optik parametreler .....</b>	<b>61</b>
<b>Tablo 4.5. Hareketli platformun çalışma parametreleri .....</b>	<b>67</b>
<b>Tablo 5.1. Proje çıktıları .....</b>	<b>82</b>



## ŞEKİL LİSTELERİ

Şekil 2.1. Doğrudan kristal büyütülmesi .....	4
Şekil 2.2. Katı faz.....	4
Şekil 2.3. AIC çekirdek.....	5
Şekil 2.4. Sıvı Faz Kristalizasyonu .....	5
Şekil 2.5. Gömülü kontak .....	7
Şekil 2.6. 2 µm Si filmin güneş ışığını soğurması .....	7
Şekil 2.7. Küme modlu lazer atımlarının zamansal profili .....	9
Şekil 3.1. Lazer kristalizasyon taslağı .....	13
Şekil 4.1. Çok kazanlı PECVD sistemi .....	15
Şekil 4.2. Çok kazanlı PECVD sistemi .....	15
Şekil 4.3. E-beam buharlaştırma sistemi .....	16
Şekil 4.4. İlk SiN <sub>x</sub> denemesinin SEM görüntüleri .....	17
Şekil 4.5. İlk SiN <sub>x</sub> denemesinin optik mikroskop görüntüleri .....	17
Şekil 4.6. “II” numaralı örneğin optik mikroskop görüntüsü.....	18
Şekil 4.7. SiN <sub>x</sub> örneklerinin dalgaboyu-kırılma indisi grafikleri.....	18
Şekil 4.8. GÜNER kapasiteli eşlenmiş plazma kazanı.....	19
Şekil 4.9. E-beam buharlaştırma sistemi şeması.....	20
Şekil 4.10. E-beam evaporatörünün cihaz şeması .....	21
Şekil 4.11. E-beam evaporatör cihazı .....	22
Şekil 4.12. E-beam evaporatörün örnek haznesi.....	22
Şekil 4.13. Farklı ara tabaklı a-Si ince filmler; a) ara tabakasız, b) SiN <sub>x</sub> , c) SiO <sub>2</sub> , d) TiO <sub>2</sub> ....	23
Şekil 4.14. 1064 nm dalga boyuna sahip kristalizasyon için kullanılan lazer sistemleri.....	23
Şekil 4.15. 24 µJ atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	24
Şekil 4.16. 27 µJ atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	24
Şekil 4.17. 30 µJ atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	24
Şekil 4.18. 34 µJ atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	24

<b>Şekil 4.19.</b> 37 $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	25
<b>Şekil 4.20.</b> Lazer kristallenmenin uygulandığı bölgeler.....	25
<b>Şekil 4.21.</b> 15 $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	26
<b>Şekil 4.22.</b> 22 $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	26
<b>Şekil 4.23.</b> >22 $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon .....	27
<b>Şekil 4.24.</b> a-Si:H, c-Si ve lazer ile kristallendirilmiş bölgenin Raman analizleri.....	28
<b>Şekil 4.25.</b> Farklı lazer atım enerjisinde kristallendirilen örneklerin Raman tepe pozisyonları ve FWHM değerleri .....	29
<b>Şekil 4.26.</b> Lazerle elde edilen kristal yapılar .....	30
<b>Şekil 4.27.</b> Kristallendirilen filmlere ait Raman kayması tayfları .....	30
<b>Şekil 4.28.</b> Kristallendirilen filmlere ait Raman analizi .....	31
<b>Şekil 4.29.</b> EBSD analizi .....	31
<b>Şekil 4.30.</b> Atım üst üste binme oranı %70 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey .....	32
<b>Şekil 4.31.</b> Atım üst üste binme oranı %80 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey .....	33
<b>Şekil 4.32.</b> Atım üst üste binme oranı %90 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey .....	33
<b>Şekil 4.33.</b> Atım üst üste binme oranı %95 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey .....	34
<b>Şekil 4.34.</b> Güneş hücresi üretiminin şematik anlatımı .....	36
<b>Şekil 4.35.</b> Farklı güçlerle taranan a-Si örneği.....	37
<b>Şekil 4.36.</b> Farklı lazer gücüyle elde edilen poly-Si yapıların Raman analizleri.....	37
<b>Şekil 4.37.</b> 15 W ve 16 W lazer taramalarıyla elde edilen poly-Si yapıların optik mikroskop görüntüleri .....	38
<b>Şekil 4.38.</b> 16 W ve 16.4 W enerji aralığında elde edilen poly-Si tabakaların Raman analizleri .....	39
<b>Şekil 4.39.</b> P-tipi ve N-tipi poly-Si soğurucu tabakalar .....	39
<b>Şekil 4.40.</b> P-Tipi ve N-Tipi soğurucu tabakaların Raman analizleri .....	40
<b>Şekil 4.41.</b> GÜNAM Çok Kazanlı PECVD Sistemi.....	41
<b>Şekil 4.42.</b> Planlanan Güneş Gözesi Aygıt Şeması.....	41
<b>Şekil 4.43.</b> Cam üzerine 200 nm AZO .....	42

<b>Şekil 4.44.</b> Cam üzerine 90 nm SiNx.....	42
<b>Şekil 4.45.</b> 4-Probe iletkenlik ölçümü .....	43
<b>Şekil 4.46.</b> Veeco DEKTAK 6M, ODTÜ-GÜNAM.....	43
<b>Şekil 4.47.</b> AZO kaplamalarının iki farklı noktasından alınan DEKTAK kalınlık profilleri .....	43
<b>Şekil 4.48.</b> AZO kaplamalı a-Si:H kaplı filmin lazer ile kristallendirme denemesi.....	44
<b>Şekil 4.49.</b> a ve b tasarımlarında $\mu$ c-Si katmanları e-Beam ile, c ve d yapılarındaki $\mu$ c-Si katmanları PECVD ile üretilip lazer kristallendirme işlemi uygulanmıştır. ....	44
<b>Şekil 4.50.</b> a ve b güneş gözelerinde $\mu$ c-Si katmanları e-Beam ile, c ve d yapılarındaki $\mu$ c-Si katmanları PECVD ile üretilip lazer kristallendirme işlemi uygulanmıştır. ....	45
<b>Şekil 4.51.</b> a) e-Beam metodu kullanarak direkt cam üzerinde, b) N-c-Si pul üzerinde üretilen güneş gözesi I-V ölçümleri .....	45
<b>Şekil 4.52.</b> e-Beam metodu kullanarak direkt cam üzerinde oluşturulan güneş gözesi.....	46
<b>Şekil 4.53.</b> Lazer Kristalizasyon Sisteminin Şeması .....	47
<b>Şekil 4.54.</b> Ön Yükselteçteki Pompa Diyotunun Güç Akım Grafiği .....	48
<b>Şekil 4.55.</b> Ön Yükselteç Mimarisi.....	49
<b>Şekil 4.56.</b> Ön Yükselteç Çıkışından Elde Sinyalin Atımı .....	49
<b>Şekil 4.57.</b> Ön Yükselteç Çıkışından Elde Edilen Sinyalin Periyodu .....	49
<b>Şekil 4.58.</b> Ara Yükselteç Mimarisi.....	50
<b>Şekil 4.59.</b> Yükselteç Mimarisi .....	52
<b>Şekil 4.60.</b> Ara Yükselteç ve Yükselteçte Kullanılan Diyotların Güç Akım Grafikleri .....	52
<b>Şekil 4.61.</b> Yükselteç Çıkışındaki Doğrusal Olmayan Etkilerin Bulunduğu Optik Tayf (Logaritmik) .....	53
<b>Şekil 4.62.</b> Yükselteç Çıkışındaki Doğrusal Olmayan Etkilerin Bulunduğu Optik Tayf (Çizgisel) .....	53
<b>Şekil 4.63.</b> <i>Yükselteç Çıkışında 20 W Güçte Elde Edilen Optik Tayf (Logaritmik)</i> .....	53
<b>Şekil 4.64.</b> <i>Yükselteç Çıkışında 20 W Güçte Elde Edilen Optik Tayf (Çizgisel)</i> .....	53
<b>Şekil 4.65.</b> <i>Yükselteç Çıkış Gücünün Pompa Gücüne Göre Grafiği</i> .....	54
<b>Şekil 4.66.</b> Fiber lazer deney düzeneği .....	55
<b>Şekil 4.67.</b> Fiber lazerin yerleştirileceği kutu .....	55

<b>Şekil 4.68.</b> Fiber lazerin kutulanma sürecindeki hali .....	55
<b>Şekil 4.69.</b> Fiber lazerin tamamen kutulanmış hali .....	55
<b>Şekil 4.70.</b> İkincil harmonik üretiminin olduğu optik devre .....	57
<b>Şekil 4.71.</b> 1064 nm-532 nm güç oranları grafiği .....	58
<b>Şekil 4.72.</b> 532 nm lazer veriminin, 1064 nm sinyal gücüne göre grafiği .....	58
<b>Şekil 4.73.</b> Serbest uzay optik kısmının şeması .....	59
<b>Şekil 4.74.</b> Üçüncül harmonik üretiminin verim grafiği .....	61
<b>Şekil 4.75.</b> Fiber lazer serbest uzay optik kısmı .....	62
<b>Şekil 4.76.</b> 1064 nm, 532 nm ve 355 nm lazer demetlerinin izledikleri yollar .....	63
<b>Şekil 4.77.</b> 532 nm lazer demetinin üretildiği durum .....	63
<b>Şekil 4.78.</b> 532 nm lazer demeti .....	64
<b>Şekil 4.79.</b> 355 nm lazer demeti .....	64
<b>Şekil 4.80.</b> 532 nm lazer demetinin şekli .....	64
<b>Şekil 4.81.</b> 1064 nm lazer demetinin şekli .....	64
<b>Şekil 4.82.</b> 355 nm lazer demetinin şekli .....	64
<b>Şekil 4.83.</b> Periskop, hareketli düzener ve çizgisel odaklayıcı optik sistemin bir çizimi .....	65
<b>Şekil 4.84.</b> Masasıyla hareketli platform ve çizgisel odaklayıcı optik sistem .....	66
<b>Şekil 4.85.</b> Odaklayıcı optik sistem .....	66
<b>Şekil 4.86.</b> Hareketli platformun modeli .....	68
<b>Şekil 4.87.</b> Hareketli platformun fotoğrafı .....	68
<b>Şekil 4.88.</b> Kullanıcı arayüzü .....	70
<b>Şekil 4.89.</b> Elektronik isterlerin şeması .....	71
<b>Şekil 4.90.</b> 216 atomlu a-Si hücresi .....	72
<b>Şekil 4.91.</b> 432 (üst paneller) ve 648 (alt paneller) atomlu a-Si/k-Si arayüzeylerinin MD sonraki yapıları (sol paneller) ve z-ekseni (hücrenin uzun kenarı) yönündeki atom yoğunlukları .....	74
<b>Şekil 4.92.</b> Si (sol) ve SiO <sub>2</sub> (sağ) kristal yapıları .....	75
<b>Şekil 4.93.</b> Si/SiO <sub>2</sub> arayüzü. Kırmızı küreler O, sarı küreler ise Si atomlarını temsil etmektedir. ....	75

**Şekil 4.94.** Simülasyon boyunca zamana göre enerji grafiği (sol), simülasyon sonucundaki yüzeyin yapısı(sağ) .....76

**Şekil 4.95.** Eksen boyunca Si (sol) ve O (sağ) atomlarının yoğunlukları.....77

## ÖZET

Gerçekleştirdiğimiz projede silisyum tabanlı polikristal-amorf silisyum ince film güneş gözesi üretimine özelleşmiş bir lazerle kristalizasyon platformunun sanayi-üniversite işbirliği sayesinde geliştirilmesi sağlanmıştır. Yola çıkış hedeflerimiz bu teknoloji ve üniversite araştırma olanakları kullanılarak ince film silisyum güneş gözesi üretilebileceğinin gösterilmesi ve üretim yöntem basamaklarının ortaya konmasıdır. Günümüz fotovoltaik piyasasındaki en büyük pazar payı yaklaşık %90 ile kristal silisyum (c-Si) pul tabanlı gözelere aittir. Ancak avantajlarına rağmen pul tabanlı Si göze teknolojisinin dünya enerji pazarındaki yeri halen sınırlıdır. Bu konudaki en büyük engellerden biri yüksek malzeme giderlerine bağlı üretim maliyetinin diğer enerji sektörleri ile rekabet edecek seviyede olmamasıdır. Aktif madde kullanımını optimize ederek üretim masraflarını düşürmeyi amaçlayan ince-film teknolojileri maliyet bariyerini aşarak fotovoltaik enerji dönüşüm teknolojilerini diğer teknolojilerle rekabet edebilir hale getirecek bir çözüm potansiyeli vaad etmektedir. İnce film poli-Si yaklaşımı ile tek kristal silisyuma yakın kalitede, mikrometre ölçeğinde tane büyüklüğüne sahip poli-Si ince filmlerin proje kapsamında büyütülmesi ve fotovoltaik hücre üretiminde kullanılması hedeflenmiştir. Cam alttaş üzerine elektron demet buharlaştırma yöntemi ile katkılanmış amorf silisyum tabakalar biriktirilerek ve kristalizasyon için özel olarak tasarlanıp geliştirilmiş lazer sisteminin çizgisel odağı bu yüzey üzerinde taranarak amorf silisyumun polikristal silisyuma kristalizasyonu sağlanmıştır. Üretilen polikristal silisyum yine katkılanmış ince bir amorf silisyum ile kaplanarak heteroeklem elde edilmiş, bu aygıtın üst ve alt kontakları Al termal buharlaştırılmasıyla oluşturularak aygıt üretimi tamamlanmıştır. Tüm üretim basamakları arasında optik, mekanik ve elektriksel ölçümler gerçekleştirilerek işlem basamaklarının iyileştirilmesi sağlanmış, gerektiği durumlarda lazer sisteminde de iyileştirmelere gidilmiştir. Verimliliklerde artış elde etmek için kenar yalıtımı ve plazmonik yapıların entegrasyonu da gerçekleştirilmiştir. Üretilen polikristal Si malzemenin dinamiği moleküler dinamik sayısal benzetim yöntemiyle kuramsal olarak çalışılmıştır. Projemiz sonucunda çağrı programıyla uyumlu olarak göze üretiminde yerli üretim altyapısı oluşturmaya doğrudan katkı, geniş alanlı, düşük üretim maliyetli, polikristal-amorf silisyum heteroeklem ince film güneş gözesi üretilmesi, bu üretimi sağlayabilmek için fiber lazer teknolojisine dayanan yenilikçi, çok fonksiyonlu ve özgün bir ince film kristalizasyon ve işleme platformu prototipi geliştirilmesi başarılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** ince film güneş gözesi, fiber lazer, lazer kristalizasyonu, polikristal silisyum

## ABSTRACT

This project has achieved to develop a laser crystallization platform designated for the production of silicon based polycrystalline-amorphous silicon thin film solar cells through collaboration between industry and academia. The main goals of the project is to demonstrate that thin film crystalline silicon solar cells can be developed by utilizing the technological and academic research capabilities, as well as establishing the methodological approach for accomplishing this challenging task. The current photovoltaics market is dominated by crystalline silicon (c-Si) wafer based cells, with a share of about 90%. Despite its advantages Si-wafer based cells have yet to gain a considerable standing in the world energy market. One of the major obstacles for the Si-wafer cells is the raw material costs that keeps the production costs from reaching competitively low levels. Thin film technologies offer a solution to the overcome the cost problem by optimizing the active material usage. In this project, in-situ doped a-Si layers are deposited on glass. The a-Si layers are subsequently crystallized by scanning the linear focus of a dedicated laser system designed for this purpose on the film surface. Following heterojunction structure formation by growing a doped thin a-Si layer on the poly-Si, top and bottom contact are produced by thermal evaporation of Al to finalize the device structure. During and in between each production step, optical, mechanical and electrical analysis will be carried out in order to optimize process parameters, and where found necessary, modifications to improve the laser system will be undertaken. In order to further improve device performance, edge isolation and plasmonic light trapping schemes have been utilized. To understand the crystallization process on a theoretical level, molecular dynamics numerical simulation methods are used. The heterojunction properties will be studied via DFT simulation method. As a result of our project, in line with the call program, direct contribution to national infrastructure for production of wide area, low cost polycrystalline-amorphous silicon hetero-junction thin-film solar cells; and an innovative, multifunctional and original fiber laser technology based thin film crystallization and processing platform prototype has been commissioned.

**Keywords:** thin film solar cell, fiber laser, laser crystallization, polycrystalline Silicon

## 1. GİRİŞ

Kullanılmakta olan enerji kaynaklarının yerini alabilecek alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi, yükselen enerji talebi ve fosil yakıtlarının kullanımından kaynaklanan çevre sorunlarını da içeren nedenlerden dolayı her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Güneş enerjisi yükselen enerji talebini karşılayabilme konusunda en çok gelecek vadeden enerji kaynağı olarak görünmektedir. Bu bağlamda Silisyum tabanlı yarı iletken malzemeler, güneş gözesi üretmek için en uygun malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyum, oksijenden sonra yeryüzünde en bol bulunan ikinci element olmasının yanısıra enerji bant aralığı açısından güneş tayfını iyi oranda soğurmaya elverişli bir katkısız yarı iletkendir. Fakat Si yine de yarıiletken dünyasında göreceli olarak zayıf bir soğurucu olduğundan kristal Si (k-Si) güneş hücrelerinde kalın Si pullar kullanılmaktadır. Proje önerimizin amacı ince film fotovoltaik güneş gözelerinin üretimlerinde göze verimini artırırken üretim maliyetini düşürmeye yarayacak ileri teknoloji lazer ile kristalizasyon yöntemlerini geliştirmek ve bunu göze üretimine uygulayarak düşük maliyetli olmasına karşın yüksek verimli ince film güneş gözesi üretebilen teknolojiyi ülkemize kazandırmaktır. Proje önerimiz silisyum tabanlı polikristal-amorf silisyum ince film güneş gözesi üretimine özelleşmiş bir lazerle madde işleme platformunun sanayi-üniversite işbirliği sayesinde geliştirilmesini, bu teknoloji ve üniversite araştırma olanakları kullanılarak ince film silisyum güneş gözesi üretilebileceğini göstererek üretim basamaklarının ortaya konmasını amaçlamaktadır.

Bu amaçla yapılan çalışmalarımız aşağıdaki ara hedeflerin gerçekleştirilmesi üzerine kurgulanmıştır:

Sanayi tarafından 1064 nm / 532 nm / 355 nm dalga boylarında çalışan nanosaniye atımlı küme modlu, çizgisel odaklı fiber lazer sisteminin tasarlanması ve sanayi (FiberLAST) tarafından üniversite (ODTÜ-GÜNAM/NEU) geri bildirimi ile iyileştirilerek üretimi,

Üniversite tarafından lazer kullanılarak cam, kuvars ya da yığın silisyum alttaşlar üzerinde amorf silisyuma görece üstün elektriksel özelliklere sahip ince film polikristal Si tabaka üretilmesi, karakterizasyonu ve üretiminin optimizasyonu,

Üniversite tarafından amorf silisyumun lazer ile etkileşmesi ve polikristal faza geçişinin atomistik mekanizmasının klasik moleküler dinamik yöntemi ile incelenmesi; lazerin gücü ve sıcaklık gibi parametrelerin değiştirilebileceği bu benzetim yöntemiyle yapılmış olan ölçümlerin yorumlanması ve yeni deneylerin tasarlanması,



Üniversite tarafından lazerle kristalize edilen tabakalar kullanılarak ince film p-n heteroeklem eldesi, karakterizasyon ve optimizasyonu,

Üniversite tarafından moleküler dinamik sonucunda elde edilen heteroeklemlerin elektronik ve yapısal özelliklerinin kuvantum kuramsal olarak incelenmesi, amorf/polikristal heteroeklemlerin yük yoğunluğu fonksiyoneli teorisi (DFT) kullanılarak kristal eksen, heteroeklem kalınlığı, amorflik derecesi gibi parametreler değiştirilerek incelenmesi,

Sanayi tarafından üretilen lazer sisteminin optik aksamının mekanik aksamla birleştirilerek üniversite ortamında kullanılmaya hazır bir platform olarak sunulması,

Üniversite tarafından platform kullanılarak polikristal-amorf heteroeklem güneş gözesi üretilmesi, ara basamaklarının geliştirilmesi ve lazer işleme platformunun optimize edilmesine yönelik geri bildirimlerin verilmesi,

Üniversite tarafından bir ince film silisyum güneş gözesi eldesi için gereken kontak ve kenar yalıtım son basamaklarının optimizasyonu ve gözenin eldesi.

Bu ara hedeflere ek olarak, lazerle polikristal Si tabaka üretimini takiben polikristal yüzeyin plazmonik gümüş nanoparçacık donatımı ve sonrasında amorf Si kaplama ile p-n eklemi oluşturularak plazmonik gümüş nanoparçacık taşıyan Si göze üretilerek verimin daha da yükseğe çekilebileceğinin araştırılması da hedeflerimiz arasındadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Proje önerimiz polikristal ve amorf silisyum ince film güneş gözelerinin lazer kristalizasyon yöntemiyle üretim teknolojisinin ve bu amaca özelleşmiş bir fiber lazer ince film göze işleme platformunu teknoloji ve prototipinin geliştirilmesini kapsamaktadır. Buna göre önerdiğimiz proje kapsamı iki ana konu başlığı altında gruplandırılabilir: A-ince film polikristal silisyum güneş gözeleri, B-küme modlu fiber lazerler.

### **İnce Film Polikristal Silisyum (poli-Si) Fotovoltaik Güneş Gözeleri**

Günümüz fotovoltaik piyasasındaki en büyük pazar payı yaklaşık %90 ile kristal silisyum (c-Si) pul tabanlı gözeler aittir (Becker vd., 2013). Bu teknolojinin temel avantajları ideal bant aralığı, kararlılığı, dayanıklılığı, bolluğu, çevreye zararsız olması gibi silisyumun (Si) doğasında bulunan özellikleri kapsamakla birlikte (Tao vd., 2011), mikroelektronik endüstrisi tarafından on yıllar boyunca geliştirilmiş altyapı ve bilgi birikiminin c-Si göze üretimine kolaylıkta uyarlanabilmesidir. Ancak bütün bu avantajlarına rağmen pul tabanlı Si göze teknolojisinin dünya enerji pazarındaki yeri halen sınırlıdır. Bu konudaki en büyük engellerden biri yüksek

malzeme giderlerine bağlı üretim maliyetinin diğer enerji sektörleri ile rekabet edecek seviyede olmamasıdır. Aktif madde kullanımını optimize ederek üretim masraflarını düşürmeyi amaçlayan ince-film teknolojileri bu noktada önem kazanmakta ve maliyet bariyerini aşarak fotovoltaik enerji dönüşüm teknolojilerini diğer teknolojilerle rekabet edebilir hale getirecek bir çözüm olanağı sunmaktadır. İnce film fotovoltaik alanında bugüne kadar kayda değer başarı gösteren teknolojiler, kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum galyum diselenyum (CIGS) gibi silisyuma alternatif malzemeleri kapsamakla birlikte, amorf Si (a-Si) ve mikrokristal Si ( $\mu$ c-Si) gibi kristal silisyumdan yapısal olarak farklılık gösteren malzemeleri de barındırmaktadır. Ancak yukarıda bahsedilen teknolojilerin hiçbiri verimlilik/maliyet oranı olarak kristal yapıya kalın c-Si güneş hücreleri ile rekabet edecek seviyeye ulaşamamışlardır. Ayrıca bu teknolojilerin uzun vadede yayılmasını engelleyebilecek zehirli olma (CdTe), doğada az bulunma (CdTe, CIGS) ve kararsız olma gibi potansiyel sorunların varlığı bilinmektedir (Andersson vd., 2000; Staebler vd., 1977). İnce film poli-Si yaklaşımının bahsedilen dezavantajları bulunmayıp, tek kristal silisyuma yakın kalitede, mikrometre ölçeğinde tane büyüklüğüne sahip poli-Si ince filmlerin büyütülmesi ve fotovoltaik hücre üretiminde kullanılmasını hedeflemektedir.

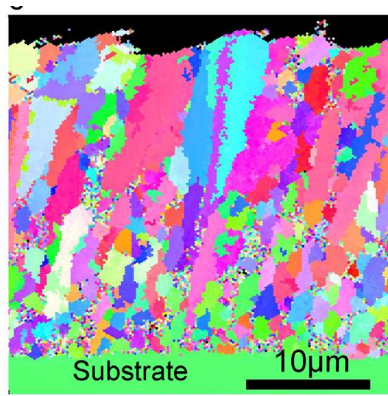
### **İnce film poli-Si üretim yöntemleri**

İnce film poli-Si üretiminde temel amaç, üretilen tabakanın kristal tane büyüklüğünün tabaka kalınlığının 3-10  $\mu$ m civarı ve üzeri olmasıdır. Böylece fotovoltaik ışık-akım dönüşümü sırasında ortaya çıkan yük taşıyıcılarının, kusur yoğunluğu yüksek tane sınırları ile etkileşime girmeden kontaklara ulaşması hedeflenmektedir. Bu teknolojiler için tane büyüklüğünün yanı sıra tane içi kusurların en aza indirilmesi de yük taşıyıcıların hareketliliği için ayrıca önem taşımaktadır (Van Gestel vd., 2009). Poli-Si ince film üretimi sırasında göz önüne alınması gereken ölçütlerden bir diğeri de alttaş (veya üsttaş) olarak kullanılan malzemeye binen ısı yüküdür. Zira işlem sıcaklıklarının (ya da alttaşa binen ısı yükünün) düşük tutulması halinde kullanılabilecek alttaş malzeme seçenekleri arttırılacak ve soda kireç silikat camları gibi ucuz malzemelerin kullanılmasına olanak verilerek maliyet düşürülmeye çalışılacaktır (Bergmann vd., 1998).

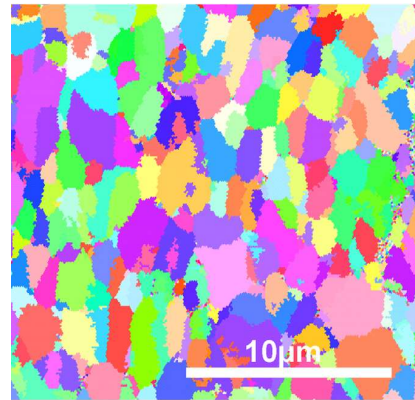
Son yıllarda ivme kazanmış olan ince poli-Si tabakaların üretimi için kullanılan kristalizasyon teknikleri ve genel üretim yaklaşımları çeşitlilik göstermektedir. Bu yöntemlerden öne çıkanlara ve günümüzdeki durumlarına aşağıda kısaca değinilmiştir.

**Doğrudan kristal büyütülmesi:** Bu yöntemde amaç ek bir ısı işlem basamağına ihtiyaç duymadan silisyum filmi kristal halde biriktirmektir. Böylece poli-Si üretiminin mümkün olduğunca basit ve hızlı şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Buradaki kritik unsur biriktirme sırasında alttaşın sıcaklığıdır. Her ne kadar Si kristalizasyonu 400 °C'ye kadar düşük

biriktirme sıcaklıklarında gözlemlenmiş (Becker vd., 2009) olsa da fotovoltaik hücreler için arzu edilen mikro yapıların oluşması için sıcaklığın çok daha yüksek seviyelerde olması gerektiği bilinmektedir. Şekil 2.1'de 900 °C'de büyütülmüş poli-Si filmin yan kesitinin elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) yöntemiyle alınmış görüntüsü görülmektedir (Becker vd., 2013). Ayrıca doğrudan kristal büyütme ile geliştirilmiş fotovoltaik hücreler içerisinde bugüne kadar en başarılı olanı Carnel ve arkadaşları tarafından 1130 °C'de büyütülmüş olup %5,0 verimliliğe sahiptir (Carnel vd., 2008). Kristalizasyon için gerekli yüksek işlem sıcaklıkları ve kayda geçmiş verimlilik değerlerinin düşüklüğü göz önüne alındığında doğrudan kristal büyütülmesi, günümüz poli-Si üretime yöntemleri arasında en az umut vaat eden olarak görünmektedir. Bu yöntem alternatif yaklaşımlarda poli-Si'nin iki veya daha fazla aşamada üretimi tasarlanmakta olup, ilk etapta üretilen a-Si tabaka ilerleyen aşamalarda kristalize edilmektedir.



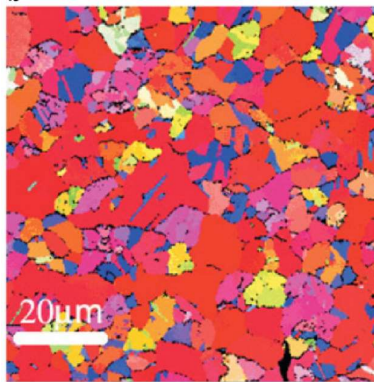
**Şekil 2.1.** Doğrudan kristal büyütülmesi



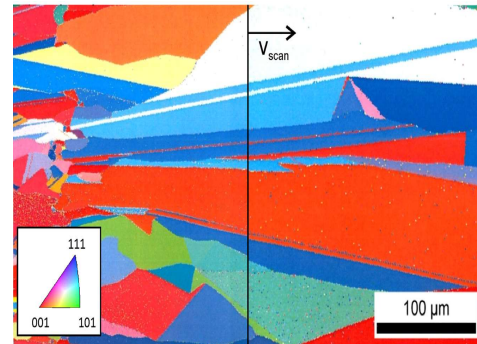
**Şekil 2.2.** Katı faz

Katı faz kristalizasyonu (SPC): poli-Si üretim yöntemleri arasında en eski ve en yaygın olanı SPC'dir. Burada amaç çeşitli biriktirme yöntemleri ile oluşturulmuş a-Si tabakanın erime noktasının altındaki sıcaklıklarda (genellikle 600 °C civarı) tutularak kristalizasyonun gerçekleştirilmesidir. SPC ile üretilmiş karakteristik bir yüzeyin EBSD görüntüsü Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekildeki tane renklerinin gelişigüzel dağılımından da anlaşılacağı üzere SPC ile oluşturulmuş tanelerin yöneliminde genellikle herhangi bir seçicilik gözlemlenmemektedir (Becker vd., 2013). Ayrıca SPC ile üretilmiş poli-Si filmlerde yoğun miktarda tane içi kusurun varlığı bilinmektedir. Bu sebeple 900 °C'de yapılacak hızlı ısıtılma işleminin (RTA) kusurların minimize edilmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Sontheimer vd., 2011). SPC yöntemiyle üretilmiş en başarılı fotovoltaik göze CSG Solar firması tarafından üretilmiş olup %10,4'luk bir verimlilik elde etmiştir (Becker vd., 2013).

Çekirdek tabaka (seed layer) yaklaşımı: Bu yöntemde hedeflenen öncelikle çok ince ve yüksek kalitede bir kristal “çekirdek” tabaka büyütmek, daha sonra bu çekirdek üzerine epitaksiyel biriktirme yoluyla soğurucu tabakayı oluşturmaktır. Bu sayede çekirdek film, soğurucu tabaka için şablon görevi görecek ve nihai yapının kristal özelliklerinin belirlenmesinde birincil rol oynayacaktır (Van Gestel vd., 2013). Çekirdek tabaka a-Si filmin kristalize edilmesi ile oluşturulur ve tipik olarak 50-400 nm kalınlığındadır (Gall vd., 2002; Schneider vd., 2006; Wang vd., 2007; Nast vd., 2000). Çekirdek tabaka kristalizasyonu için lazer kullanılabileceği bilinmekle birlikte (Slaoui vd., 2012), yaygın olarak çalışılmış yöntem tabaka değiş-tokuşuna dayalı alüminyum yardımcı kristalizasyon (AIC) tekniğidir. AIC yönteminde başlangıç aşamaları alttaş üstüne Al biriktirilmesi ve yüzeyin oksidasyonudur. Al oksidasyonu genellikle bir dış ortamda yapılmakta ve AIC’nin genel işleyişinde kritik rol oynamaktadır (Nakajima vd., 2009). Daha sonra Al filmin üzerine büyütülen a-Si fırında ısıtılarak tabaka değiş-tokuşu sağlanır. Fırın sıcaklığı Al-Si ötektik sıcaklığının (577 °C) altında tutularak işlemin katı fazda gerçekleşmesi sağlanır. Tabaka değiş-tokuşu öncesi amorf yapıda olan Si film öncelikle Al fazı içinde çözülür, daha sonra (çözünürlük limiti aşıldığında) yeniden çekirdeklenecek kristal yapıda ortaya çıkar (Nast vd., 2000). AIC’nin son aşamasında artık en üstte kalmış Al tabaka fiziksel ya da kimyasal yöntemler ile yüzeyden kaldırılır. Bu yöntem ile elde edilmiş çekirdek tabakanın EBSD görüntüsü Şekil 2.3’de verilmiştir (Lee vd., 2008). Şekildeki kırmızı renk yoğunluğundan da anlaşılabileceği gibi AIC yöntemi ile üretilen filmlerde genellikle <100> tane yönelimi hâkimdir. Üretilen çekirdek tabakanın üzerine ısıl iyon yardımcı biriktirme, elektron demeti biriktirmesi ya da katı faz epitaksi (SPE) gibi yöntemler uygulanarak soğurucu tabaka büyütülür (Straub vd., 2005; Gorka vd., 2007). Bu yöntem ile üretilen fotovoltaik gözelerin performansını sınırlayan önemli bir etken tane içi kusurlardır (Van Gestel vd., 2007), ve kayda geçmiş maksimum verimlilik değerleri henüz %8 seviyesindedir (Gordon vd., 2007).



Şekil 2.3. AIC çekirdek



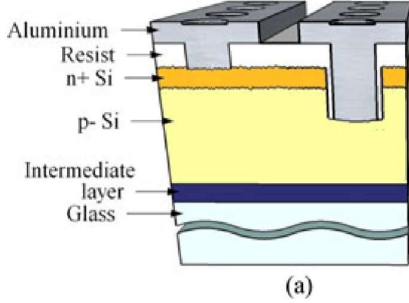
Şekil 2.4. Sıvı Faz Kristalizasyonu

Sıvı faz kristalizasyonu (LPC): Son yıllarda geliştirilmiş ve büyük ilgi görmekte olan bu yöntemdeki temel amaç enerji kaynağını a-Si film üzerinde odaklamak, böylelikle altta üstündeki ısı yükü minimize ederken a-Si film sıcaklığını erime noktasının (1414 °C) üstüne çıkarmaktır. Bu amaçla elektron demeti, lazer veya halojen lamba gibi farklı enerji kaynaklarının kullanımı rapor edilmiştir (Andra vd., 2005; Dore vd., 2013; Amkreutz vd., 2011; Morikawa vd., 1998). LPC yöntemiyle üretilen poli-Si filmlerin tane büyüklüğü milimetre ölçeğine ulaşabilirken (Şekil 2.4) tane içi kusur yoğunluğu yukarıda bahsedilen diğer yöntemlerle üretilen poli-Si filmlere göre oldukça düşüktür. Bu özellikleri dolayısıyla LPC güneş gözeleri, poli-Si tasarımlar arasında rekor kabul edilen açık devre voltajlarına (> 580mV) ulaşabilmiştir (Haschke vd., 2013; Dore vd., 2014). LPC kristalizasyon işlemi saniyeler mertebesinde gerçekleşmektedir (Becker vd., 2013) ve saatler süren SPC ve AIC tekniklerine ile karşılaştırıldığında büyük ölçekte üretim uygulamaları için önemli bir avantaj olarak göze çarpmaktadır. Bunun yanı sıra LPC ile üretilen poli-Si filmlerin yapısal kalitesinin başlangıç a-Si tabakasından bağımsız olması bu tabakanın üretimi için basit, hesaplı ve hızlı tekniklerin kullanılmasına olanak vermektedir. LPC işleminde poli-Si filmlerin yapısal karakterini etkileyen en önemli unsurun ışınlama parametreleri olduğu bilinmektedir. Burada enerji kaynağının gücü, dalga boyu, tarama hızı gibi parametrelerin optimizasyonu poli-Si tane yapısı ve filmde ışınlanmaya bağlı hasarın minimize edilmesi konusunda birincil öneme sahiptir (Andra vd., 2005).

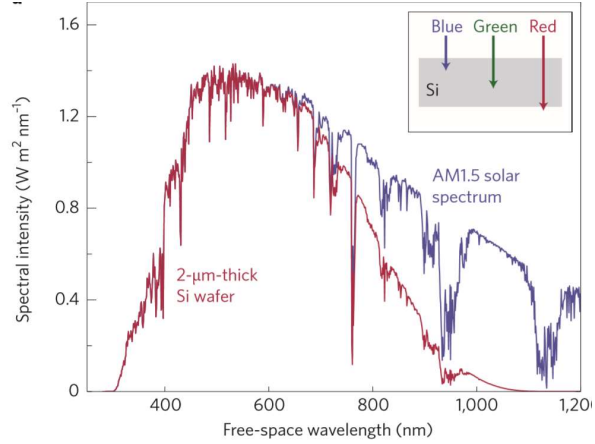
LPC ile üretilen fotovoltaiik gözelerde kısa sürede önemli gelişme kaydedilmiştir. Bugüne kadar kaydedilen en yüksek verimlilik değeri 11,7% ile 808 nm sürekli dalga (CW) diyet lazerle üretilen poli-Si gözelerle ait olmakla birlikte bu gözelerde kontak bozulmasına bağlı geçici verimlilik düşüşü gözlemlenmiştir (Dore vd., 2014). Elektron demeti kullanarak üretilen LPC gözelerde ise 582 mV gibi çok yüksek açık devre voltajlarına (Voc) ulaşılmasına rağmen verimlilik henüz %5,7 ile sınırlıdır (Haschke vd., 2013). LPC gözelerin %12'lik kritik barajı (Varlamov vd., 2013) geçebilmesi için kritik unsur kısa devre akımının (Jsc) artırılmasıdır ve bunun için yığın ve ara yüz birleşmesini (rekombinasyonunu) ve kontak direncinin en aza indirilmesini sağlayacak malzeme işleme yöntem iyileştirmeleri yapılması önem taşımaktadır.

Yukarıda bahsedilen LPC yöntemi ile üretilmiş ve rekor açık devre voltajlarına ulaşmış iki tasarım (e-demeti kristalizasyon, %5,7 verimlilik (Haschke vd., 2013); ve CW lazer kristalizasyon, 11,7% verimlilik (Dore vd., 2014)) karşılaştırıldığında Jsc (dolayısıyla verimlilik) farkını etkileyen en önemli etmenin kontak tasarımları olduğu görülmektedir. Öyle ki, düşük verimliliğe sahip gözede yayıcı (emitter) kontaklarının yarıdan fazlasının kırıldığı/işlevini yitirdiği görülmüştür (Haschke vd., 2013). Bu durumu önlemek için gömülü (buried) kontakların kullanımı kritik bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Bu yaklaşımla üretilmiş ve rekor verimlilik

değeri elde edilmiş lazer kristalizasyonlu göze tasarımı Şekil 2.5'de (Dore vd., 2014) görülebilir. Bu noktada kontak deliklerinin reaktif iyon aşındırma (RIE) gibi hassas bir teknik kullanılarak açılması kontak direncinin minimize edilebilmesi için son derece büyük önem kazanmaktadır.



**Şekil 2.5.** Gömülü kontak



**Şekil 2.6.** 2 µm Si filmin güneş ışığını soğurması

### Plazmonik Yapılar

İnce film fotovoltaik gözelerde verimliliği sınırlayan bir diğer önemli etmen bant aralığına yakın dalga boylarındaki ışığın tümüyle soğrulmadan filmin içinden geçmesi, dolayısıyla enerji üretimine katkıda bulunamamasıdır. Yetersiz soğrulmaya bağlı kayıplar özellikle Si gibi indirekt bant aralıklı yarı iletken olan ince filmler için kayda değerdir (Şekil 2.6) (Atwater vd., 2010). Bu durumda, ışığı filmin içinde uzun yol almasını hedefleyen "hapsetme" yöntemleri soğrulmanın artırılması için gerekli görülmektedir. c-Si pul gözelerde yaygın olarak kullanılan alkali bazlı piramit desenleme yöntemi birkaç mikron kalınlığındaki Si ince filmlerde uygulanamamaktadır. Ayrıca film yüzey alanındaki artışın yüzeyde gerçekleşen azınlık taşıyıcı birleşmesini (minority carrier recombination) artırarak göze performansına olumsuz etki yaptığı bilinmektedir. Metal nano yapılar kullanarak ışığın soğurucu tabaka içerisinde aldığı yolu, diğer bir deyişle filmin fiziksel kalınlığını arttırmadan optik kalınlığını arttırmayı amaçlayan plazmonik yapılar Si ince film gözelerinin verimliliğini yukarı çekmek için umut vaat eden bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Plazmonik parçacıkların diğer bir kullanım alanı olarak da aygıt eklemesinde alan yükseltici olarak düşünülmektedir. Birkaç 10 nm boyutlarındaki soy metal (Ag, Au) nanoparçacıkların serbest elektronlarıyla üzerlerine düşen elektromanyetik dalgalar görülür bölgede çınlamakta (rezonans etmekte) ve bu da yakın alanlarında çok yüksek alan genliği oluşmasını sağlamaktadır. Dipol benzeri plazmon alanı oluşarak dipol kutuplarında alan çizgilerinin yaklaşmasıyla çok yüksek genlikler oluşmaktadır. Kutup bölgeleri göze eklemesindeki aktif malzemenin ışığı etkin bir şekilde soğurmasını sağlayacak bir odaklama



etkisi yaratacağı düşünülmektedir. Bu çeşit nanoparçacıklara literatürde nanolens ya da optik nanoanten adı verilmektedir.

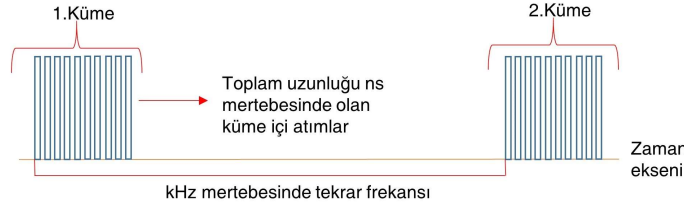
### **Küme Modlu Fiber Lazerler**

Malzeme işlemeye yönelik geliştirilen 1  $\mu\text{m}$  dalga boyundaki Yb katkılı fiber lazerlerin günümüzde kullanım alanları oldukça genişlemiştir. Hassas malzeme işleme işlemleri için fiber lazer kullanılan çalışmalarla ilgili de atımların modifikasyonuna olan ilgi artmış, özellikle ısı etkilerinin minimize edilerek daha verimli malzeme işlemeye yönelik küme modlu çalışan fiber lazerlerle ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Günümüzde seri üretimi yapılan MOPA (master oscillator power amplification) ya da Q-Switch yapılandırmasına dayalı nanosaniye atımlı malzeme işlemeye yönelik sistemlerin atım uzunlukları ve davranışları malzeme yüzeyinde ısı etki oluşturarak kazıma, markalama ve kesme gibi işlemlerin yapılmasına yönelik tasarlanmış olup, birçok hassas malzeme işlemesi için ise uygun değildir. Küme modlu lazer sistemlerinde saniyenin milyonda birine yakın bir sürede belirli sayıda atımların üretilmesi ve bu atımların MHz seviyesinde yüksek tekrar frekansı ile çalıştırılması amaçlanır. Kümelenmiş atımlar femtosaniye ya da pikosaniye mertebesinde uzunluklara sahip MHz seviyesindeki tekrar frekansında atımlar olup, tüm küme kHz mertebesinde tekrarlı bir şekilde çalıştırılır. Bu şekilde kümenin toplam atım enerjisi tek bir atımmış gibi bir etkinin oluşması sağlanır (Şekil 2.7). Atımların kümelenmeden tek başına gönderilmesi sırasında plazma kalkanlaması gibi görülmesi olası verimlilik düşürecek etkilerin minimize edilmesi sağlanarak malzemeye zarar verecek etkilerden büyük ölçüde arındırılmış şekilde işlenmesi sağlanır.

### **Harmonik üreteçle 532 ve 355 nm dalga boyunda sinyal üretilmesi**

Artan taleple beraber değişik dalga boylarına olan ihtiyaç da benzer şekilde artış göstermiş ve farklı malzemelerin farklı dalga boylarındaki soğrulma karakteristiklerine göre fiber lazer ihtiyacı doğmuştur. Silisyum malzemenin işlenmesi için tercih edilen lazer sistemleri genellikle 800 nm Ti-Safir ya da 532 nm Nd-YAG sistemler olup bu sistemler periyodik optik ayarlama gerektiren, titreşimden etkilenebilen, maliyeti yüksek ve büyük sistemlerdir. Son yıllarda oldukça gelişen ikinci dereceden doğrusal olmayan etki gösteren kristal teknolojisi kullanılarak, frekans katlanması yöntemiyle, fiber lazer dalgaboylarından 532 nm ve 355 nm dalgaboylarının verimli şekilde elde edilmesi mümkündür. Bu uygulama için kullanılan kristallere belirli bir dalga boyunda gönderilen giriş demeti öncelikle aynı doğrultuda fakat yarı dalga boyuna sahip bir ışın demetine çevrilir. Bu işlem ikinci harmonik üretimi olarak adlandırılır ve bunun için kullanılan temel kristaller lityum niyobat ( $\text{LiNbO}_3$ ), potasyum titanil fosfat ( $\text{KTiOPO}_4$ ), beta baryum borat (BBO) ya da lityum triborat (LBO)'dur. İkinci harmonikle üretilen 532 nm'deki lazer demeti ile lazerden gelen ana demet başka bir kristal daha kullanılarak bu

iki demetteki fotonların enerjileri toplamına denk gelen 355 nm dalga boyunda ışık elde edilmesi mümkündür.



**Şekil 2.7.** Küme modlu lazer atımlarının zamansal profili

Harmonik üretimi faz ile ilişkili bir süreç olup, üretim sonrası verimin yüksek olması için faz uyumu önemlidir. Atımlı lazer kaynakları ikinci ve üçüncü harmonik üretimi için sürekli dalga lazerlere göre daha kolay bir şekilde dalga boyu yarılanması sağlar. Bunun temel nedeni harmonik üretimi için gerekli olan yoğunluktaki enerjiye atımlı lazerler aracılığıyla daha kolay ulaşılabilir olmasıdır. Harmonik üretimi sonrası yüksek verim elde etmek için kristalin farklı bölgelerinde üretilen ikinci ya da üçüncü harmonik dalganın kristal çıkışından faz uyumlu olarak çıkması gerekmektedir. Faz uyumunun iyi karakterizasyonu ile %50 seviyesinde bir verimlilikle harmonik üretim mümkündür (Driscoll vd., 1986). Faz uyumunun iyi karakterize edilmediği durumlarda kristal yapının doğrusal olmayan özelliği nedeniyle pompa ve ikinci ya da üçüncü harmonik arasında sağladığı enerji akışında faz uyumsuzluğu görülebilir. Bu durumda verimlilik seviyesinin bir hayli düşmesi kaçınılmazdır.

Faz uyumsuzluğunu önlemek için dikkat edilmesi gereken hususlardan bazıları şunlardır: Birinci kristale giren lazer demeti sonucunda elde edilen ikinci harmonik dalga boyundaki ışının polarizasyonunun bu işlem sırasında dönmüş olması sebebiyle yarım dalga geciktirici kullanılarak ana demet ile aynı polarizasyona getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca kristalin içinden geçen ışının diğer ışına göre bir gecikmeye uğramış olması sebebiyle ana lazer demeti, bu gecikmeyi telafi edecek şekilde bir gecikme ortamından (mekanik bir gecikme yolu ya da özel bir kristal) geçirilmelidir. Bu amaçla sisteme bir kristal daha eklenerek bu şart sağlanacaktır. Hem ikinci harmonik hem de üçüncü harmonik üretimi yöntemi “kritik olmayan faz uyumlanması” (non-critical phase matching) yöntemiyle yapılacaktır. Bu yöntemde faz uyumunun sağlanması kristal yöneliminin sıcaklık kullanılarak değiştirilmesiyle olmaktadır. Bu nedenle harmonik üretiminde kullanılacak doğrusal olmayan kristaller, “kristal fırını” (crystal oven) denilen özel ısıtıcılar içine yerleştirilerek sıcaklıklarının belli bir değerde tutulması sağlanacaktır (örneğin LiNbO<sub>3</sub> kristal ve 1064 nm dalga boyu için yaklaşık 150 °C). Bu işlemler sonucunda çıkışta elde edilen 3 dalga boyu da her dalga boyuna özel dielektrik aynalar



yardımıyla tarama sistemine iletilecek, gerekli yerlerde çift renkli aynalar ya da geniş spektrumlu aynalar kullanılarak aynı optik yola sokulmaları sağlanacaktır.

#### KAYNAKLAR

- Becker C., vd. 2013. "Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives", Solar Energy Materials and Solar Cells, 119, 112
- Tao C.S., vd. 2011. "Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, 95, 3176
- Andersson B. A., vd. 2000. "Materials Availability for Large-scale Thin-Film Photovoltaics" Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 61
- Staebler D. L., vd. 1977. "Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Si" Applied Physics Letters, 31, 15
- Van Gestel D., vd. 2009. "Investigation of intragrain defects in pc-Si layers obtained by aluminum-induced crystallization: Comparison of layers made by low and high temperature epitaxy" Materials Science and Engineering B 159–160,134
- Bergmann R. B., vd. 1998. "Nucleation and growth of crystalline silicon films on glass for solar cells" Physica Status Solidi (A), 166, 587
- Becker C., vd. 2009. "Microstructure and photovoltaic performance of polycrystalline silicon thin films on temperature-stable ZnO:Al layers", Journal of Applied Physics, 106,
- Carnel L., vd. 2008. "Efficient solar cells based on fine-grained polysilicon" Thin Solid Films, 516, 6839
- Sontheimer T., vd. 2011. "Characterization and control of crystal nucleation in amorphous electron beam evaporated silicon for thin film solar cells" Journal of Applied Physics, 110, 063530
- Van Gestel D., vd. 2013. "Aluminum-induced crystallization for thin-film polycrystalline silicon solar cells: Achievements and perspective" Solar Energy Materials & Solar Cells 119, 261
- Gall S., vd. 2002. "Aluminum-induced crystallization of amorphous silicon" Journal of Non-Crystalline Solids, 299–302, 741
- Schneider J., vd. 2006. "Aluminum-induced crystallization: Nucleation and growth process" Journal of Non-Crystalline Solids, 352, 972

- Wang J.Y., vd. 2007. "Mechanism of aluminum-induced layer exchange upon low-temperature annealing of amorphous Si/polycrystalline Al bilayers" Journal of Applied Physics, 102,113523
- Nast O., vd. 2000. "Influence of interface and Al structure on layer exchange during aluminum-induced crystallization of amorphous silicon "Journal of Applied Physics, 88, 15
- Slaoui A., vd. 2012. "Laser processing for thin film crystalline silicon solar cells" Proceedings of SPIE Vol. 8473, 84730C-1
- Nakajima K., vd. 2009. "Crystal growth of Si for solar cells" Springer Press, Berlin
- Nast O., vd. 2000. "Elucidation of the layer exchange mechanism in the formation of polycrystalline silicon by aluminum-induced crystallization" Journal of Applied Physics, 88, 124
- Lee K.Y., vd. 2008. "Large-grained poly-Si films on ZnO:Al coated glass substrates" Thin Solid Films 516, 6869
- Straub A., vd. 2005. "Optimisation of low-temperature silicon epitaxy on seeded glass substrates by ion-assisted deposition", Journal of Crystal Growth, 280, 385
- Gorka B., vd. 2007. "Low-temperature epitaxy of silicon by electron beam evaporation", Thin Solid Films, 515, 7643
- Van Gestel D., vd. 2007. "Electrical activity of intragrain defects in polycrystalline silicon layers obtained by aluminum-induced crystallization and epitaxy" Applied Physics Letters 90, 092103
- Gordon I., vd. 2007. "8% Efficient thin-film polycrystalline-silicon solar cells based on aluminum- induced crystallization and thermal CVD", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 15, 575
- Andra G., vd. 2005. "Laser crystallized multi crystalline silicon thin films on glass" Thin Solid Films 487(1–2), 77.
- Dore J., vd. 2013."Thin-film polycrystalline silicon solar cells formed by diode laser crystallisation", Progress in Photovoltaics: Research and Applications 21, 1377
- Amkreutz D., vd. 2011."Electron–beam crystallized large grained silicon solar cell on glass substrate", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19, 937

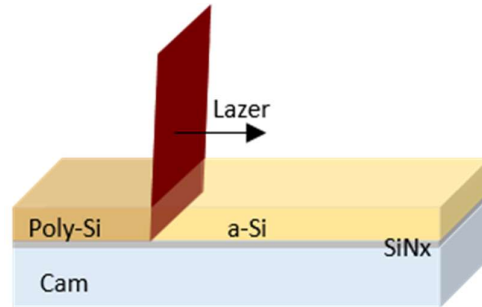
- Morikawa H., vd. 1998. “16.0% efficiency of large area (10cm\_10cm) thin film polycrystalline silicon solar cell” Solar Energy Materials and Solar Cells, 53, 23
- Haschke J., vd. 2013. “Polycrystalline silicon heterojunction thin-film solar cells on glass exhibiting 582 mV open-circuit voltage” Solar Energy Materials and Solar Cells 115, 7
- Dore J., vd. 2014. “Progress in Laser-Crystallized Thin-Film Polycrystalline Silicon Solar Cells: Intermediate Layers, Light Trapping, and Metallization” IEEE Journal of Photovoltaics, 4, 33
- Andra G., vd. 2005. “Laser crystallized multicrystalline silicon thin films on glass” Thin Solid Films, 487, 77
- Varlamov S., vd. 2013. “Polycrystalline silicon on glass thin-film solar cells: A transition from solid-phase to liquid-phase crystallized silicon” Solar Energy Materials and Solar Cells 119, 246
- Atwater H. A., vd. 2010. “Plasmonics for improved photovoltaic devices” Nature Materials 9, 205
- Driscoll T.A., vd. 1986. “Efficient second-harmonic generation in KTP crystals”, Journal of the Optical Society of America, 3, 683
- Chowdhury A., vd. 2013. “Laser annealing of thin film polycrystalline silicon solar cell” EPJ Photovoltaics, 4, 45108
- Yang C., vd. 2012. “Molecular Dynamics Studies of Ultrafast Laser-Induced Phase and Structural Change in Crystalline Silicon”, International Journal of Heat and Mass Transport, 55, 6060
- Taheri M. L., vd. 2010. “In situ laser crystallization of amorphous silicon: Controlled nanosecond studies in the dynamic transmission electron microscope”, Applied Physics Letters, 97, 032102

### 3. GEREÇLER

Birinci iş paketi kapsamında proje boyunca kullanılacak temel ince film malzeme üretimi ve optimizasyonu bu iş paketinde gerçekleştirilmiştir. Cam ya da kuvars alttaş üzerine katkısız ve katkılı amorf silisyum tabakaların üretimi için birbirine alternatif iki yaygın yöntem, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) ve elektron demeti (e-beam) ile buharlaştırma çalışılmıştır ve üretilen a-Si filmlerin lazer ile etkileşimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

PECVD yöntemi, geniş alana biriktirme ve doğrudan hidrojen pasivasyonu gibi avantajlara sahipken e-beam buharlaştırma yüksek biriktirme hızı ve hassas katkılama profillerine olanak vermektedir. Bu teknikler için gerekli sistemler ODTÜ-GÜNAM laboratuvarlarında hali hazırda bulunmakta olup a-Si üretimi için çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Katkılama iki yöntem için de biriktirme sırasında sistem-içi (in-situ) gerçekleştirilmiştir ve PECVD için  $B_2H_6$  ve  $PH_3$  gazları, elektron demeti için de bor ve GaP efüzyon hücreleri kullanılmıştır. GÜNAM bünyesinde a-Si katkılama işlemi iki yöntem için de daha önce başarı ile uygulanmış ve özellikle elektron demeti yönteminde katkı profilinin hassas bir şekilde kontrol edilebildiği görülmüştür. Ayrıca, biriktirme ve kristalizasyon işlemleri sırasında cam alttaştan kaynaklanabilecek herhangi bir kirliliği önlemek amacıyla a-Si büyütülmesi öncesi alttaş üzerinde ince bir bariyer tabaka oluşturulmuştur. Bariyer tabaka, yaklaşık 50 nm kalınlığında silisyum nitrit ( $SiN_x$ ) olup PECVD ile büyütülmüştür.

PECVD ve e-demeti teknikleriyle üretilen a-Si filmlerin kristalizasyonu için Ana İş Paketi 3'te geliştirilmiştir. Farklı dalga boylarında atımlı lazer sistemi kullanılmıştır. a-Si tabaka kristalizasyonu GÜNAM laboratuvarlarında ns atımlı 1064 nm dalga boylu Nd-YAG lazer ile çalışılmış, Raman spektrumunda görüleceği üzere kristalizasyon başarı ile sağlanmıştır. Tasarlanmış çizgi odak lazer sisteminin esnekliği, çok çeşitli işlem parametrelerinin hızlı bir şekilde test edilmesini sağlamış ve kapsamlı bir deney matrisi oluşturulmasına olanak vermiştir. Bu evrede a-Si büyütme ve lazer işlem parametrelerinin optimizasyonu karşılıklı geri bildirimler vasıtasıyla eş zamanlı gerçekleştirilmiştir; böylelikle fotovoltaiik göze uygulamaları için en uygun kombinasyonlar bulunarak ultra-ince film c-Si fotovoltaiik yapılar oluşturulmuştur.



**Şekil 3.1.** Lazer kristalizasyon taslağı

İkinci iş paketi kapsamında fotovoltaiik hücre yapıları geliştirilmiş ve test edilmiştir. Atımlı lazer ve a-Si etkileşimi çalışmalarından elde edilen teknik bilgi bu aşamada ultra-ince fotovoltaiik göze yapılarının geliştirilmesi için kullanılmıştır. Bu amaç için öncelikle temel heteroeklem poli-Si/a-Si yapılarına sahip fotovoltaiik sistemler üretilmiştir. İş paketinin genelinde kullanılacak

teknolojik yaklaşım, yapıların işlemsel açıdan basitten karmaşığa kademeli olarak geliştirilmesine dayanmaktadır.

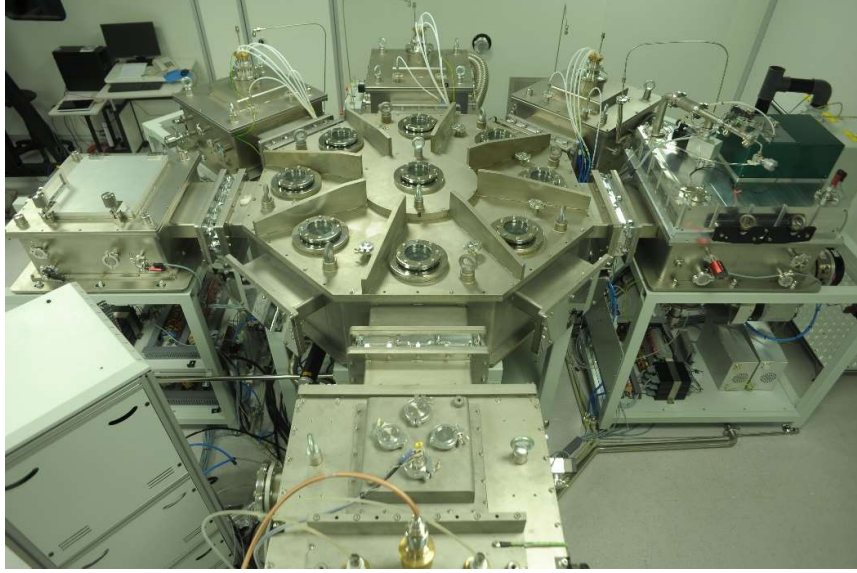
Üçüncü iş paketi kapsamında 1064 nm / 532 nm / 355 nm dalga boylarında nanosaniye atımlı çizgisel odaklı lazer sistemi geliştirilmiştir. Proje kapsamında geliştirilmiş lazer sistemi, üç farklı dalga boyunda çalışmakta olup, nanosaniye atımlı fiber lazer kaynağını içermektedir.

Dördüncü iş paketi kapsamında fotovoltaiik hücre yapıları test edilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Üretilen örneklerin yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonları için pek çok teknik kullanılmıştır. Örneklerin elektriksel özellikleri için karanlık ortamda akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Kontak alınarak hazırlanan örneklerle belirli bir değer aralığında gerilimler uygulanarak ve oluşan akım değerleri ölçülmüştür.

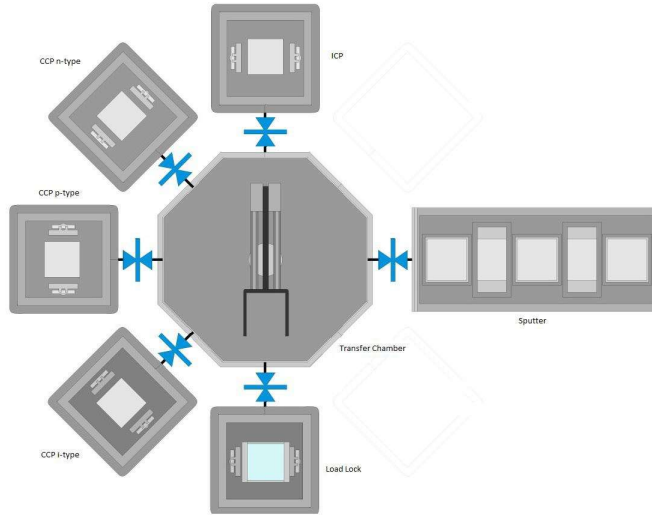
## 4. BULGULAR

### 4.1. İnce Film Katmanlarının Üretimi

Yapılan deneylerde standart alttaş olarak cam kullanılmıştır. Camdan gelebilecek kirliliği önlemek için ilk önce cam üzerine Plazma Arttırımlı Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) yöntemi ile ince silisyum nitrit ( $\text{SiN}_x$ ) tabakası üretimi yapılmıştır. Daha sonrasında ise  $\text{SiN}_x$  kaplı camın üzerine amorf silisyum üretilerek bunun kristalizasyonu çalışmalarına başlanmıştır. Çünkü bu projedeki amaç lazer kristalizasyon yöntemi ile amorf silisyumun polikristal silisyum (poly-Si) filme dönüşmesini sağlamaktır. Bu proje kapsamında üretilen  $\text{SiN}_x$  ara tabakalar ve amorf silisyum (a-Si:H) üretiminde (Vaksis) çok kazanlı (clustered chamber) PECVD sistemi ve yine amorf silisyum (a-Si) üretiminde (Vaksis) elektron demeti (e-beam) buharlaştırma sistemleri kullanılmıştır. İki sistem de ODTÜ GÜNAM laboratuvarında bulunmaktadır. Şekil 4.1. ve 4.2'de PECVD ve Şekil 4.3'de e-beam sistemleri gösterilmektedir.



**Şekil 4.1.** Çok kazanlı PECVD sistemi

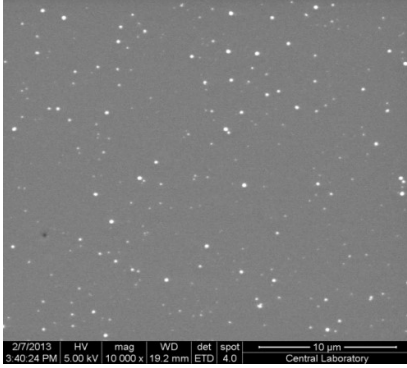


**Şekil 4.2.** Çok kazanlı PECVD sistemi

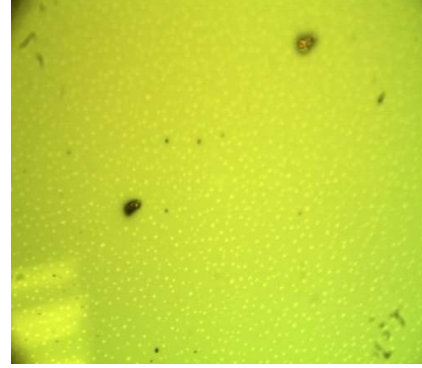


**Şekil 4.3.** E-beam buharlaştırma sistemi

Standart alttaş olarak SCHOTT AF32 ECO serisi 1,1 mm kalınlığında cam kullanılmıştır. Planlanan karakterizasyonlara bağlı olarak Silisyum pul da yeri geldikçe alttaş olarak kullanılmıştır. Si pul ve cam alttaşlar film üretiminden önce izopropanol alkol, aseton ve saf su ile ultrasonik temizliği uygulanmış, son olarak da kısa süreli (15 s) seyreltik (%5) hidroflorik asit (HF) içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra ise cam ve pul alttaşlar  $\text{SiN}_x$  ara tabaka üretimi için PECVD kazanına yüklenmiştir. Burada  $\text{SiN}_x$  ara tabaka hem camdan gelebilecek kirlilik için bariyer görevi görmektedir ve aynı zamanda filmlerin alttaşa daha iyi tutunmasını da sağlamaktadır. PECVD sistemi ile üretilen  $\text{SiN}_x$  ince filmlerin üretimi aslında daha önceden standardize edilmişse de kristalizasyon için amorf silisyum kaplama işlemine başlamadan önce üretilen  $\text{SiN}_x$  ince filmler elipsometre ile kırıcılık indisine bakılarak yeniden kontrol edilmiştir. Üretim sırasında amonyak ( $\text{NH}_3$ ) ve silan ( $\text{SiH}_4$ ) gazları kullanılmıştır. İlk yapılan deneme numunesi üretimi esnasında alttaş ısıtması yapılmamıştır. Şekil 4.1.3'te bu örneğin taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 4.4) ve optik mikroskop (Şekil 4.5) görüntüleri verilmektedir.



**Şekil 4.4.** İlk SiN<sub>x</sub> denemesinin SEM görüntüleri



**Şekil 4.5.** İlk SiN<sub>x</sub> denemesinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi film yüzeylerinde beyaz noktalar oluşmuştur. Bu noktalar filmin tam oluşmadığı yerler olarak yorumlanabilir çünkü görüntüler pul üzerinden bakılmış olup ışığın alttaki parlak pul yüzeyinden yansıması olabilir. Daha iyi bir film yapısı oluşturabilmek için bundan sonra ki denemeler 200°C alttaş sıcaklığı kullanılarak yapılmıştır. Farklı miktarlarda (NH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>) gaz oranları kullanılarak optimum SiN<sub>x</sub> film üretim koşulları elde edilmeye çalışılmıştır. Üretim basıncı 1 Torr ve PECVD gücü de 100 W ve 200 W kullanılmış olup SiN<sub>x</sub> filmler üretilmiştir. SiN<sub>x</sub> filmler elipsometre analizleri için aynı zamanda silisyum pul üzerine de kaplanmıştır, dolayısı ile kalınlık ve kırılma indisi ölçümleri pul üzerinden yapılmıştır. Elipsometre ölçümleri sonucunda kırıcılık indisi 2'ye yakın olarak bulunmuştur ki bu da literatürde de kabul edilen kırıcılık indisi değeridir. Tablo 4.1'de yapılan çalışmaların gaz akış miktarı, PECVD üretim gücü, NH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub> oranı gibi parametreleri verilmektedir.

**Tablo 4.1. SiN<sub>x</sub> örneklerinin üretim parametreleri**

	NH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub>	Güç (W)	Kalınlık (nm)
<b>I</b>	10	100	85
<b>II</b>	20	100	134
<b>III</b>	5	100	107
<b>IV</b>	2	100	110
<b>V</b>	2	200	114

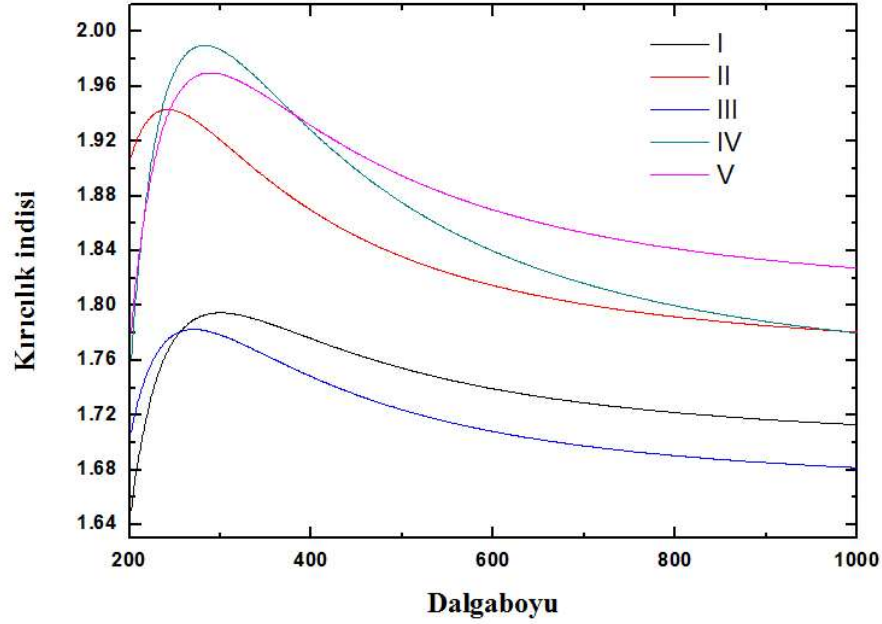
Aynı zamanda alttaş ısıtması yapılmasıyla ilk başta yapılan örnekteki beyaz benekler kaybolmuştur. Örnek olarak, Tablo 4.1'de "II" numaralı örneğe ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.6.'da verilmektedir.





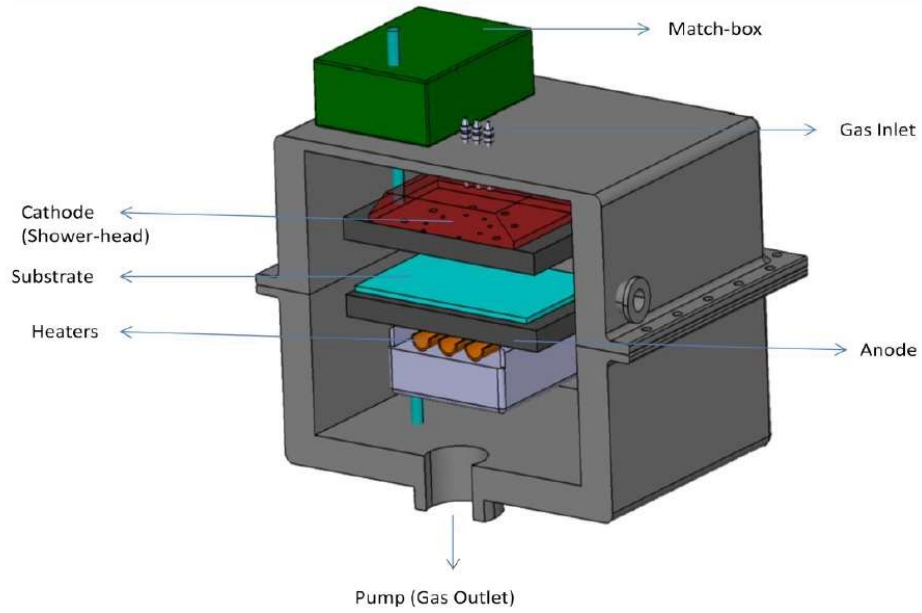
**Şekil 4.6.** “II” numaralı örneğin optik mikroskop görüntüsü

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi daha homojen bir film yüzeyi elde edilmiştir. Şekil 4.7’de ise Tablo 4.1’deki beş örneğin elipsometre ile ölçülen dalgaboyuna göre kırılma indisi grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.7.** SiN<sub>x</sub> örneklerinin dalgaboyu-kırılma indisi grafikleri

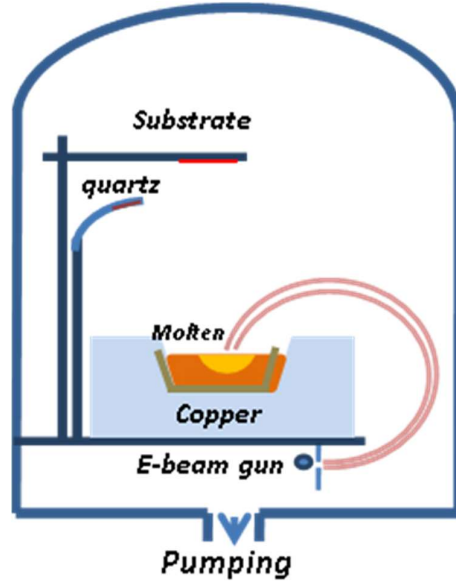
“IV” numaralı örnekte 2 kırılma indisine daha çok yaklaşmışken “V” numaralı örnekte bazı bölgelerde biraz daha aşağıda kalmıştır. Gücün 2 katına çıkmasıyla daha kalın bir tabaka beklenmekteyken öncesine göre çok fazla fark yaratan kalınlık oluşmamıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında standart proses parametresi olarak bu gazların oranı (NH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>) 2:1 olacak şekilde kullanılmıştır. Fakat bundan sonraki deneylerde SiN<sub>x</sub> filmler 30 nm olarak üretilmiştir.



**Şekil 4.8.** GÜNER kapasiteli eşlenmiş plazma kazanı

$\text{SiN}_x$  üretiminden sonra (hidrojenize) amorf silisyum (a-Si:H) üretimine geçilmiştir.  $\text{SiN}_x$  kaplı camlar PECVD kazanına yüklenmiştir (Şekil 4.8). a-Si:H üretimi için 30 sccm  $\text{SiH}_4$  ve 270 sccm  $\text{H}_2$  gaz akışı kullanılmıştır. Üretim esnasında basınç 1 Torr ve güç ise 50 W olarak ayarlanmıştır. Toplam üretim 85 dakika sürmüş ve sonunda 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında a-Si:H film elde edilmiştir.

PECVD üretiminin yanı sıra, elektron demeti (e-beam) buharlaştırma yöntemiyle de doğrudan cam üzerine amorf silisyum (a-Si) üretilmiştir. E-beam yöntemi ile üretilen a-Si filmler elektron demetiyle yüksek sıcaklığa çıkarılan saf silisyum parçacıklarının buharlaştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Dolayısı ile fiziksel bir yöntemdir ve üretim esnasında herhangi bir gaz kullanılmamaktadır. Şekil 4.9'da e-beam sisteminin genel olarak basit bir şekli gösterilmektedir.

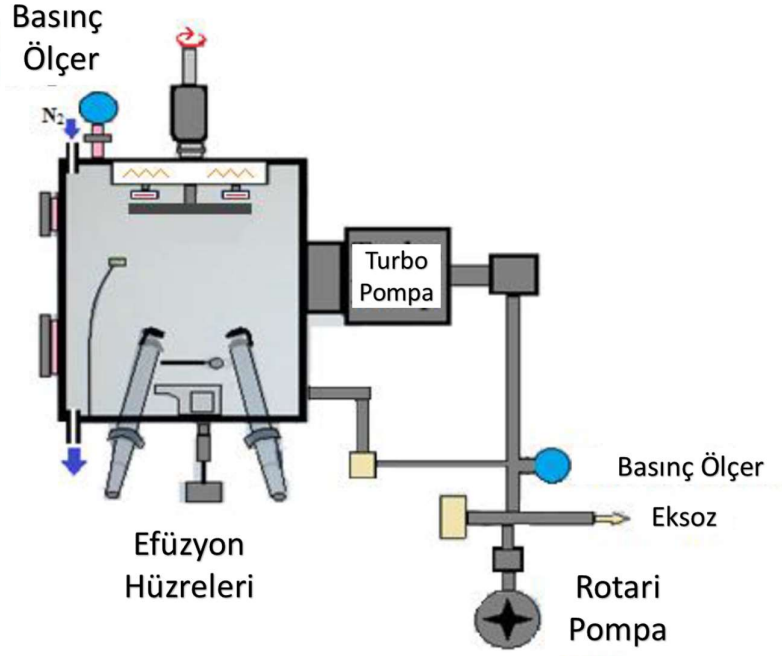


**Şekil 4.9.** E-beam buharlaştırma sistemi şeması

GÜNAM'da bulunan Şekil 4.3'deki e-beam sistemi ile ortalama  $10 \text{ Å/s}$  büyütme hızıyla  $650 \text{ nm}$  civarında a-Si film elde edilmiştir. Sistemin taban basıncı  $7 \times 10^{-8}$  Torr olup üretim sırasında yaklaşık  $4 \times 10^{-7}$  Torr civarındadır. Buharlaştırma işlemi yaklaşık  $90\text{-}105 \text{ mA}$  arası elektron demeti akımı uygulanarak sağlanmıştır.

Yapılan bütün deneylerde alttaş olarak cam kullanılmıştır. Dielektrik ara tabakaların karşılaştırması ve kristallendirme işlenimine olan katkılarını araştırmak için  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{TiO}_2$  ara tabakaları kullanılmış kristallendirme süreci ara tabaka kullanılmadan, doğrudan cam üzerine kaplanan amorf Si filmlerin lazerle kristallenmesi ile karşılaştırılmıştır. Ara tabakaların kalınlıkları  $30 \text{ nm}$  kadar tutulmuştur.  $\text{SiN}_x$  tabaka PECVD yöntemiyle,  $\text{SiO}_2$  tabaka saçırma yöntemiyle,  $\text{TiO}_2$  tabaka ise atomik tabaka kaplama (ALD) yöntemi ile büyütülmüştür. Farklı ara tabakalar üzerine kaplanan amorf Silisyum (a-Si) üretimi GÜNAM'da bulunan e-beam evaporatör sistemi ile yapılmıştır. Farklı ara tabaka etkilerinin karşılaştırılması için a-Si yapıların kalınlıkları  $650 \text{ nm}$  civarında tutulmuştur. Üretim öncesi kazan basıncı  $2 \times 10^{-7}$  Torr oluncaya kadar beklenmiştir. Üretim esnasında  $100\text{-}110 \text{ mA}$  akım kullanılarak yaklaşık  $10\text{-}15 \text{ Å/s}$  hızında Si buharlaştırılmıştır. Alttaş sıcaklığı  $250^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Bu koşullarda farklı kalınlıkta katkısız a-Si filmler üretilmiştir. Soğurucu poli-Si tabakayı elde etmek için örnekler lazer ile kristallendirilmiştir. Uygun kristallenme  $2,6 \text{ J/cm}^2$  lazer akısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan lazer tarama hızı lazerin atım frekansı sabit tutulmuştur. Lazer taraması bir çizgi üzerinde  $23 \text{ mm/s}$  tarama hızı ile  $80 \text{ kHz}$  atım sıklığı ile tarama yapmıştır. İyi kalitede kristallendirme için uygulanan bu parametreler geçen rapor döneminde de detaylandırıldığı gibi geniş bir parametre uzayının Raman spektroskopisi kullanılarak

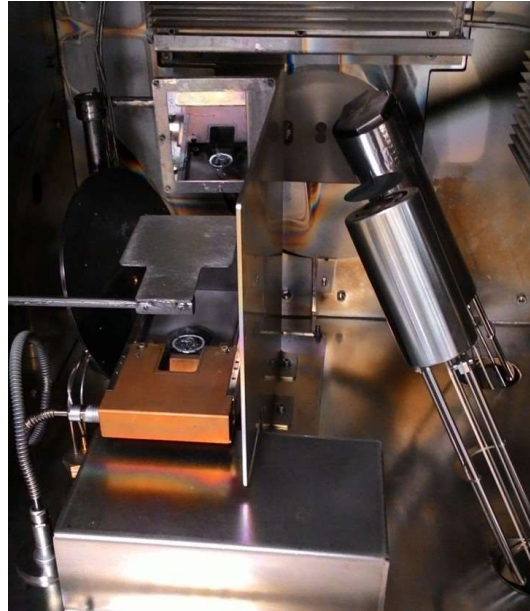
taranması ile belirlenmiştir. Yapılan taramada örnek lazerin çizgi odağına yerleştirilmiş olup taramada oluşturulan 40  $\mu\text{m}$  çaplı noktasal odak kullanılmıştır. Odağın lazer tarafından aydınlatılan yerinde ışık şiddeti düz tepe Gaussyen şeklindedir. Şekil 4.10-4.12'de sırasıyla e-beam evaporatör cihazının şeması, dış görünüşü ve hazne içi gösterilmektedir. Farklı ara tabakaların üzerine 650 nm'lik a-Si filmler bu sistem kullanılarak kaplanmıştır.



**Şekil 4.10.** E-beam evaporatörünün cihaz şeması

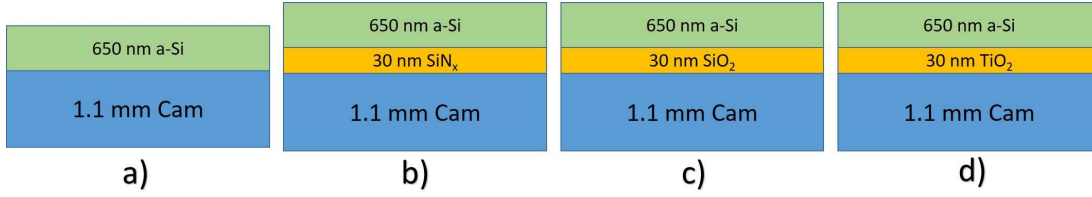


**Şekil 4.11.** E-beam evaporatör cihazı



**Şekil 4.12.** E-beam evaporatörün örnek haznesi

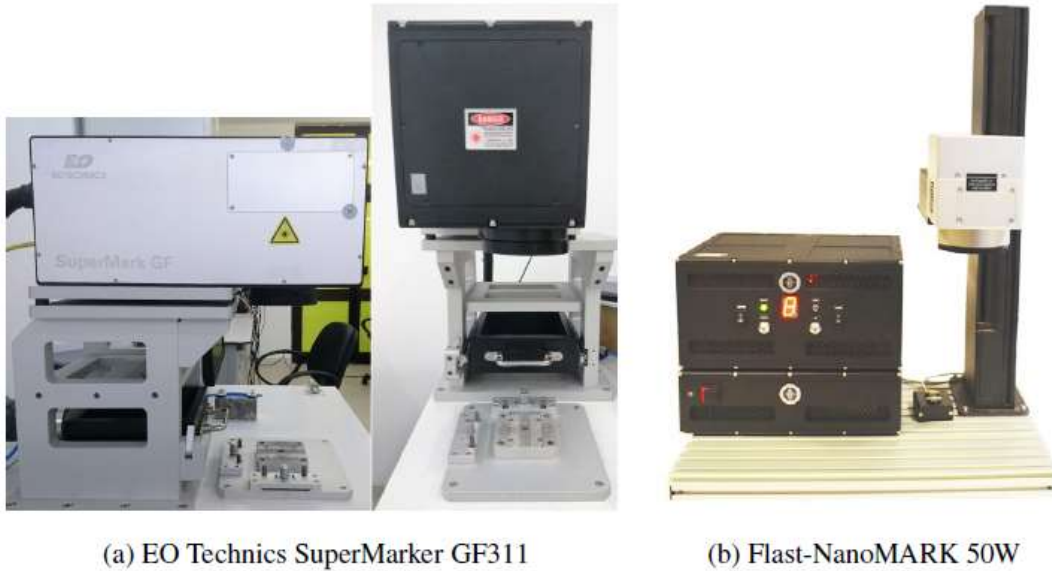
Hazırlanan örnekler Şekil 4.13'de gösterilen diyagramdaki katmanlara sahiptir.



**Şekil 4.13.** Farklı ara tabaklı a-Si ince filmler; a) ara tabakasız, b)  $\text{SiN}_x$ , c)  $\text{SiO}_2$ , d)  $\text{TiO}_2$

#### 4.2. İnce Filmlerin Lazer ile Kristallendirilmesi

Üretilen amorf silisyum filmlerin lazer ile kristalizasyonun tamamı bu bölümde ele alınmıştır. Bunun için projenin ilk döneminde yine ODTÜ GÜNAM bünyesindeki ticari 1064 nm dalga boyundaki 203 ns atımlı lazer sistemi (EO Technics) ile FiberLAST'ın ürettiği ticari markalama lazeri (Flast-NanoMARK) kullanılmıştır. Şekil 4.14'de kristalizasyon için kullanılan lazer sisteminin yan ve ön profilden görünümü verilmektedir.



**Şekil 4.14.** 1064 nm dalga boyuna sahip kristalizasyon için kullanılan lazer sistemleri

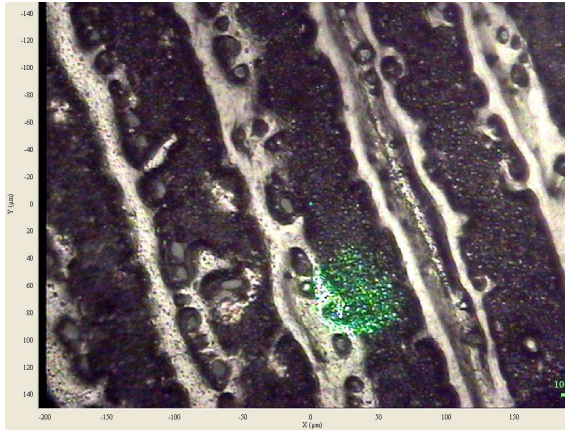
Lazer ile kristallendirme işleminde malzemeye vuran lazer çok kısa süreli olarak temas ettiği bölgeyi yüksek sıcaklığa çıkartarak silisyumun lokal olarak erimesini sağlar ve lazerin kesilmesi ya da başka tarafa kaymasıyla eriyen bölge hızla soğuyarak tekrar katılaşır. Yeniden katı faza dönme durumunda malzeme kristallenmiş olur.

##### 4.2.1. PECVD ile Büyütülmüş a-Si Katmanlar

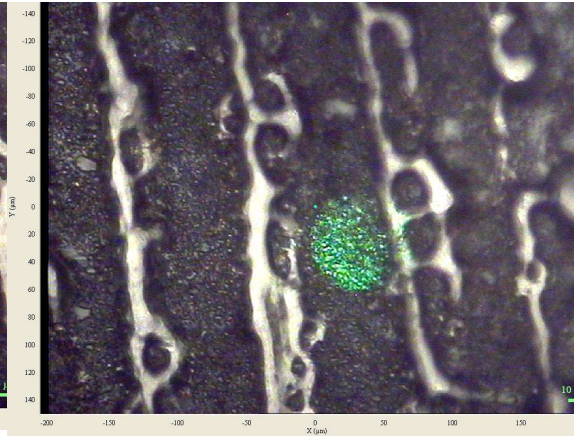
PECVD metodu ile üretilen a-Si:H örneklerin kristalize olmasının hangi lazer atım enerjilerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan lazerin atım tekrarları 80 kHz ve %97,6'lık



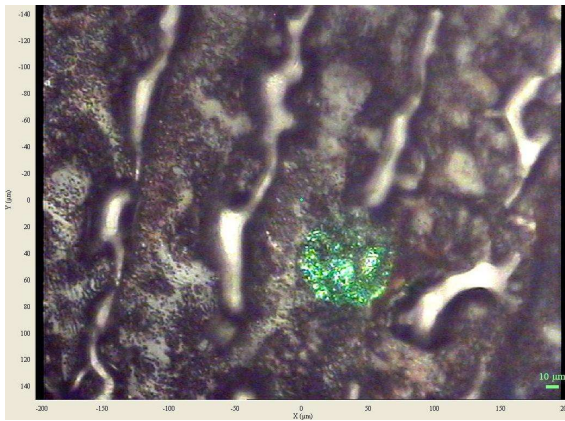
atımların üst üste bindirilmesiyle gerçekleştirilmiş olup 1  $\mu\text{m}$  a-Si:H kaplamanın kristallenme değerleri Raman spektroskopisiyle incelenmiştir. Kristallendirme işlemi 22-37  $\mu\text{J}$  arasında gerçekleşmiştir. Bu aralıkların dışında ya kristal yapılar oluşmamış ya da fazla enerjiden dolayı filmler zarar görmüştür. Kullanılan lazerin odak çapının 45  $\mu\text{m}$  civarında olması bu enerji atım değerlerinin kristalizasyonu sırasında önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.15 ila 4.19'de, lazerle farklı atım güçleri (24, 27, 30, 34, 37  $\mu\text{J}$ ) kullanılarak elde edilmiş kristalizasyon sonuçlarının optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Şekiller üzerinde görülen yeşil renkli ışık hüzmeleri kullanılan Raman spektrometresine ait uyarım lazerinden gelmektedir (532 nm) ve kristalizasyon lazeriyle ilgisi bulunmamaktadır.



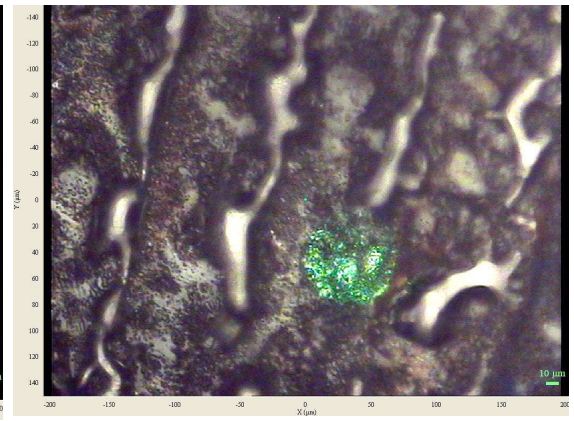
**Şekil 4.15.** 24  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon



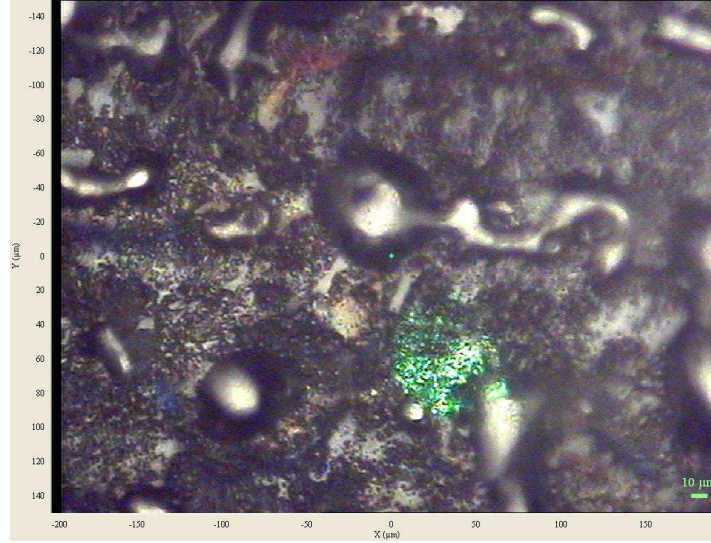
**Şekil 4.16.** 27  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon



**Şekil 4.17.** 30  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon

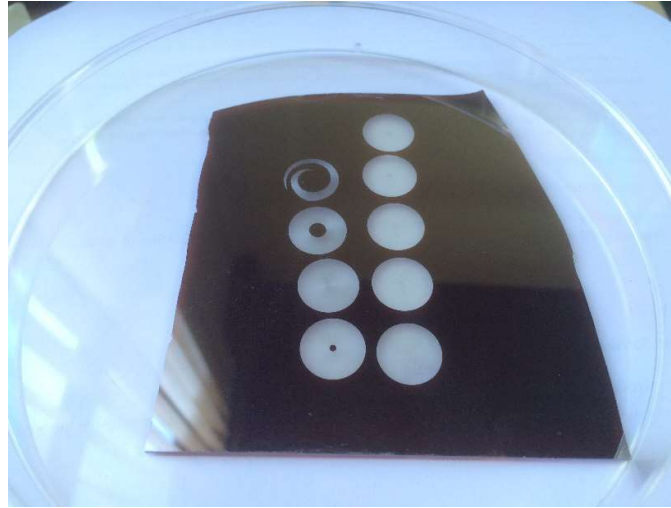


**Şekil 4.18.** 34  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon



**Şekil 4.19.** 37  $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon

Şekil 4.15 ila 4.19'dan anlaşılabacağı üzere kristalizasyonun homojen bir yüzey oluşturarak gerçekleşmediği ve yüzey farklılıkları meydana getirdiği görülmektedir. Şekillerde görülen açık renkli bölgeler kristallenmiş yapıyı göstermektedir ve buralar topaklanmış haldedir. Koyu bölgeler ise amorf yapının çok daha fazla olduğu bölgelerdir. Kristalizasyonu daha büyük ölçekte görebilmek için üretilen örneğin hiçbir büyütme kullanılmadan fotoğrafı alınmış ve Şekil 4.20'de sunulmuştur. Burada görülen daire şekilleri kristallenmiş bölgeler olurken diğer koyu bölgeler amorf yapıdadır. Şekil 4.15 ila 4.19'da görülen optik mikroskop sonuçları da bu büyük daireler içerisindeki kristal bölgelerden alınmıştır.



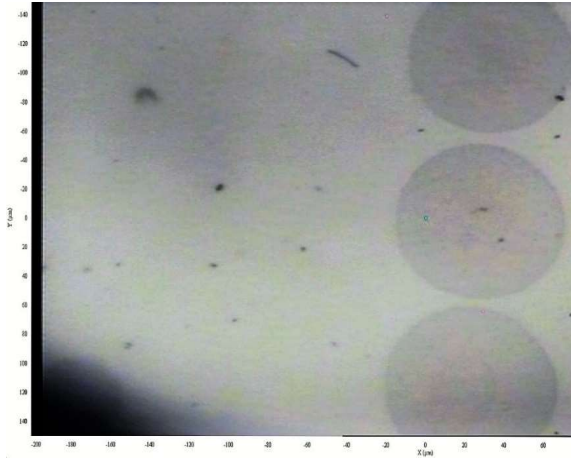
**Şekil 4.20.** Lazer kristallenmenin uygulandığı bölgeler



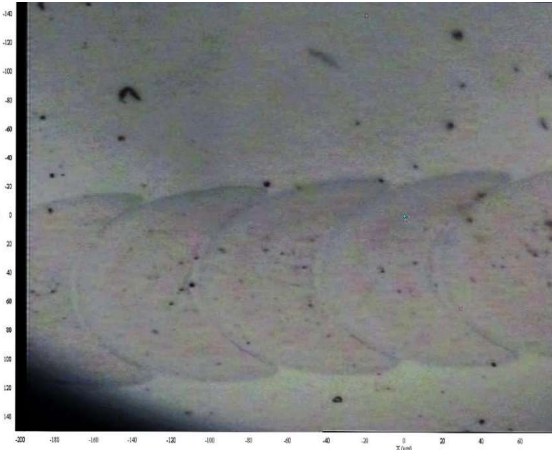
Kristallenen bölgenin ışığı soğurma katsayısı küçüldüğü için amorf kısımlara göre çok daha açık renkli gözükmektedir. Fakat PECVD ile büyütülen a-Si katmanlarda bulunan hidrojen lazer kristallendirme uygulaması sırasında yapı içindeki bağlarını koparıp aniden dışarı gaz halinde çıkarken yapı üzerindeki Si katmanlarında kalmalar ve deformasyonlara yol açmıştır. Bu durumda lazer uygulaması sırasında alttaşı olan camın görünmesine ve Si yapıların bölgesel olarak kalkmasına sebep olmuştur. Mikroskop görüntülerinde topaklanmalar ve cam alttaşı belirmesi net olarak gözükmektedir. Raman ölçümleri lazer uygulaması sonrası arta kalan ve kristalize olan Si topaklarından toplandığı için Raman sinyali vermektedir.

#### 4.2.2. E-beam Buharlaştırma ile Büyütülmüş a-Si Katmanlar

Yine alttaşı olarak SCHOTT AF32 ECO 1,1 mm kalınlığında camlar kullanılarak e-beam yöntemi ile amorf silisyum (a-Si) üretimi gerçekleştirilmiştir. E-beam ile üretilen örneklerde herhangi bir ara tabaka kullanılmayarak 650 nm kalınlığında a-Si üretimi doğrudan cam üzerine gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21 ve 4.22'de 15  $\mu\text{J}$  ve 22  $\mu\text{J}$  lazer atımlarıyla elde edilen kristallenme çalışmalarının optik mikroskop görüntüleri verilmektedir.



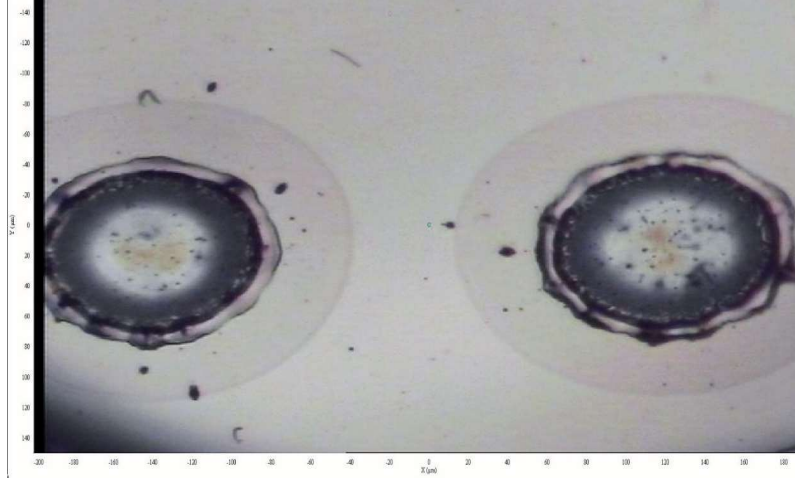
**Şekil 4.21.** 15  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon



**Şekil 4.22.** 22  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon

Optik mikroskop görüntülerinde ki koyu bölgeler lazerle işlenmiş alanlardır. Yine buradaki kristallenme çalışmalarının da Raman analizleri yapılmıştır. Şekil 4.21'deki örnekten elde edilen Raman kayması  $516,9 \text{ cm}^{-1}$  ve FWHM değeri  $6,68 \text{ cm}^{-1}$  iken; Şekil 4.22'deki örnekten ölçülen Raman kayması aynı dalga numarasında olup FWHM değeri  $5,9 \text{ cm}^{-1}$  değerine düşmektedir. Şekil 4.21'de gösterilen durum, 15  $\mu\text{J}$  enerjili atımlarla hiçbir atım üst üste gelmeden yapılmış ve bu atım enerjisi altındaki atım enerjilerinde kristallenmenin başlamadığı gözlenmiştir. Şekil 4.22'de gösterilen kristallenme ise 22  $\mu\text{J}$  atım enerjisi ve %54,2'lik atım üstüste binmesi ile oluşturulmuş olup 650 nm a-Si kaplama için kristallenmenin gerçekleştiği

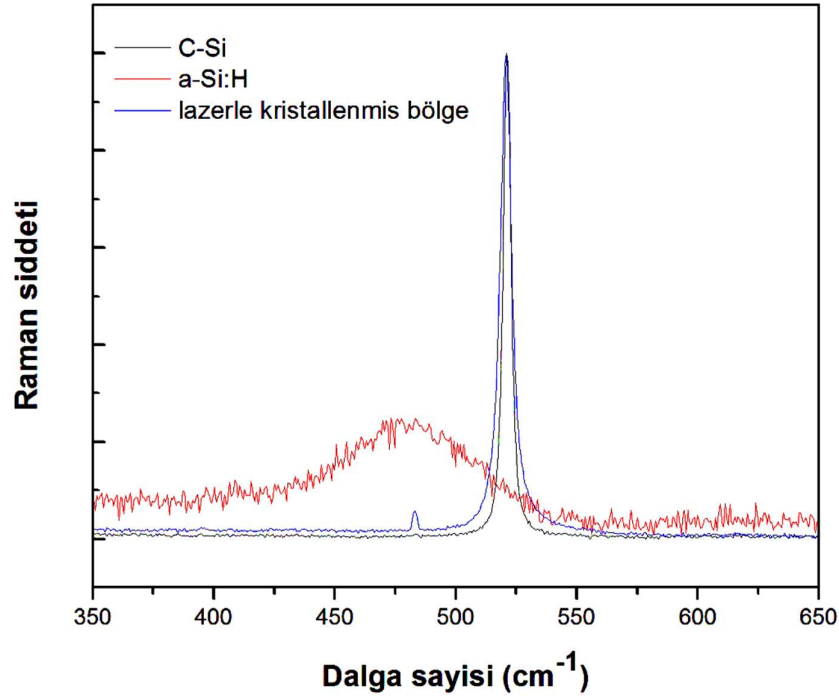
üst sınır atım enerjisidir. Üst sınır enerjisinden daha fazla enerji kullanılarak da denemeler yapılmıştır. Fakat fazla enerjinin filme zarar verdiği gözlemlenmiştir. Bunu gösteren bir çalışmanın optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.23'te verilmektedir.



**Şekil 4.23.** >22  $\mu$ J atım enerjisi ile elde edilen kristalizasyon

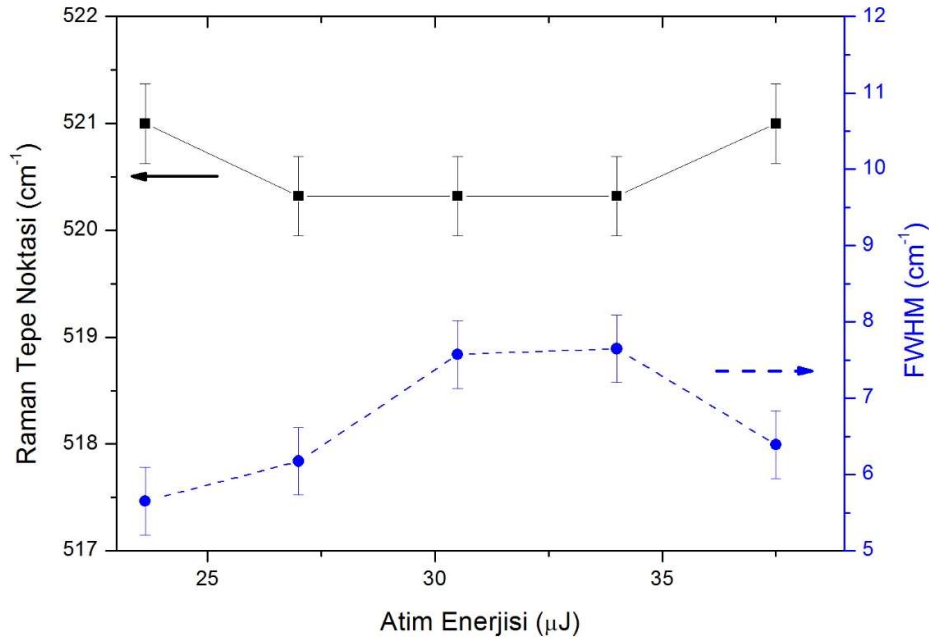
Şekil 4.23'te 650 nm kalınlıktaki a-Si film için uygulanan üst sınır atım enerjisinin aşılması ile nasıl hasar gördüğü görülmektedir. Burada atımlar üst üste binmediği için atımların yapıları detaylı görülmektedir. Yuvarlak yapıların ortalarında a-Si kaplama kalkma meydana gelmiş ve siyaha yakın olan bölge de a-Si yapısına sahiptir çünkü burası lazer işleminden sonra yüksek güçten dolayı tekrar amorf yapıya dönüşmüştür. Siyah bölgenin hemen dışındaki ince parlak bölge ise oldukça yüksek kristal yapısına sahip topaklanmış bölgedir. Buradaki durum Şekil 4.15 ila 4.19'da görülen topaklanmış parlak bölgelerle aynı şekildedir. En dışarıdaki koyu gri hare homojen kristallenmenin olduğu bölgedir. En dışta bulunan açık gri bölgeler ise a-Si olan işlenmemiş bölgedir.

Üretilen örneklerden Raman ölçümlerine geçilmiştir. Bu iş paketi kapsamında hem başlangıç a-Si hem de lazerle kristallenmiş bölgeden ölçümler alınmıştır. Şekil 4.24'te amorf bölgeden ve kristal bir bölgeden alınan Raman sonuçları görülmektedir. Bunlara ek olarak tek kristal (c-Si) silisyum pul Raman ölçümü de referans olarak verilmiştir.



**Şekil 4.24.** a-Si:H, c-Si ve lazer ile kristallendirilmiş bölgenin Raman analizleri

Şekil 4.24'teki Raman ölçümlerine bakınca lazer ile kristallendirilmiş bölgenin Raman analizinde c-Si referansı gibi 521  $\text{cm}^{-1}$  civarında tepe vermiş olduğu ve profilinin de oldukça benzemediği görülmektedir. Bu da bize kristal yapısının ve kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. Elbette kristallenme sonunda elde edilen FWHM (yarı yükseklikteki tam genişlik) değeri c-Si FWHM değerini bire bir yakalayamayacaktır ama lazer ile kristalizasyon metodunun oldukça vaat edici bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Bundan sonra ise lazer ile kristallendirilmiş örneklerin daha detaylı Raman analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde Raman sinyalleri örneklerin farklı noktalarında rastgele alınarak analizleri yapılmış ve elde edilen ortalama Raman tepe pozisyonları ile FWHM değerleri atım enerjisine bağlı olarak Şekil 4.25'te verilmiştir. Verilen bu grafikte örneklerin değişik bölgelerinden (en az 4 ayrı bölge) elde edilen istatistiki deviasyon değeri grafikteki her bir noktanın etrafında hata çubukları olarak gösterilmiştir.



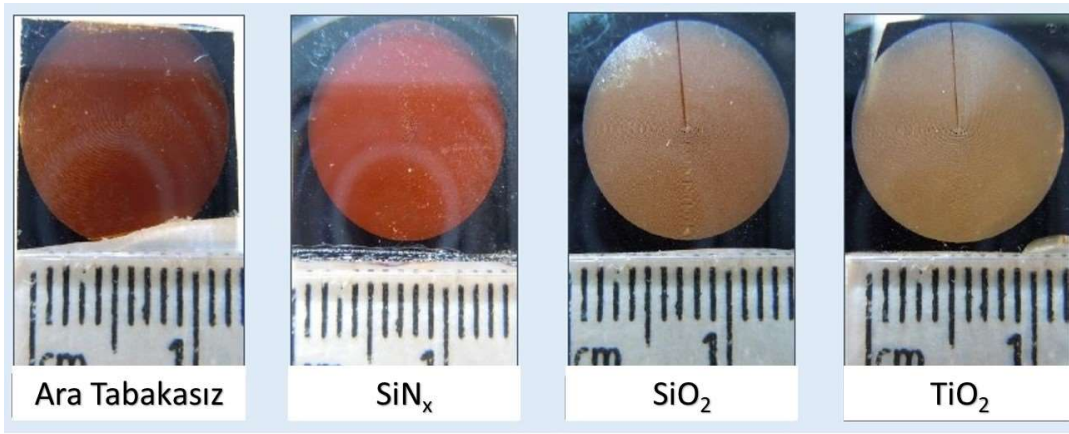
**Şekil 4.25.** Farklı lazer atım enerjisinde kristallendirilen örneklerin Raman tepe pozisyonları ve FWHM değerleri

Şekil 4.25'teki Raman analizlerinin anlaşılır olabilmesi için tek kristal silisyum kristalinin (c-Si) Raman sinyalinin tepe noktasının  $521 \text{ cm}^{-1}$  ve bunun da FWHM değerinin  $3,85 \text{ cm}^{-1}$  olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Kristal yapıların Raman ölçümüyle elde edilen bu karakteristik tepenin şekli ve pozisyonu, yapılardaki kristalizasyon miktarı, kristal yapıların (damar) büyüklükleri ve yapılar üzerindeki gerilim miktarlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu özellikler oluşturulan yapıların kristal kalitesini belirlemektedir. Raman tepe pozisyonlarına bakılacak olursa, lazer atım enerjisi arttırıldığında tepe pozisyonunun  $521 \text{ cm}^{-1}$  değerinden bir miktar aşağıya kayarak malzemede tensif (tensile) gerilime işaret ettiği görülmektedir. Bunun yanında, FWHM değerlerinde de artış görülmektedir. FWHM değerinin artması, malzeme içerisindeki kusurların artması ve dolayısı ile film kalitesinin bir miktar azalması anlamına gelmektedir. Fakat lazer atım enerjisinin artmaya devam etmesiyle film içerisindeki gerilim azalarak tepe pozisyonu yine  $521 \text{ cm}^{-1}$  değerine yaklaşmaktadır. Yine, buna paralel olarak FWHM değeri de azalmaya başlamaktadır. Raman ölçümlerine göre yaklaşık  $35 \mu\text{J}$  üzerinde lazer atım enerjisiyle elde edilen poli-Si filmlerin düşük enerjiyle üretilenlere göre daha kaliteli olduğunu söyleyebilmekteyiz. Proje kapsamında yapılan çalışmalar yalnızca  $1 \mu\text{m}$  kalınlığında PECVD ile kaplanmış filmlerin kristallenmesi için kullanılacak lazer parametrelerinin bir taraması olup işlemin optimizasyon ayağında film kalınlığına bağlı çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ancak proje başlangıcından hemen sonraki aylarda PECVD kaplama sisteminde oluşan bir teknik sorundan dolayı tutarlı film özellikleri elde edilememiş ve bir miktar

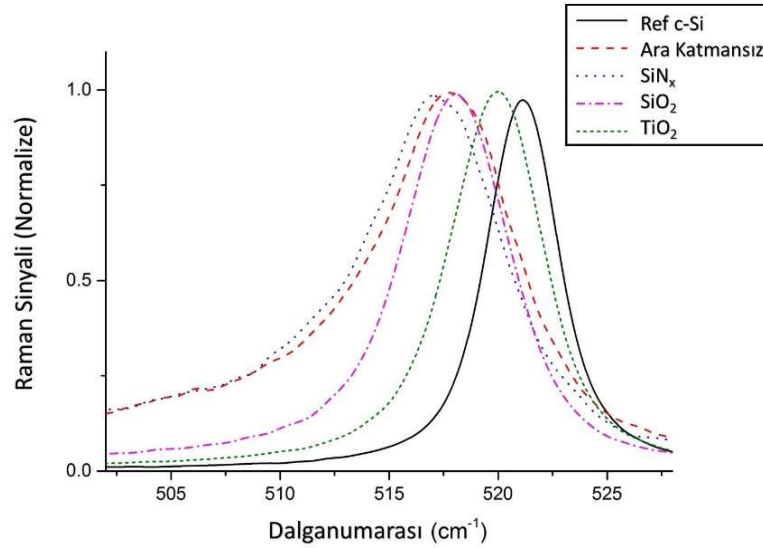
zaman kaybına neden olmuştur. Projenin bundan sonraki deneylerinde elektron ışını (e-beam) buharlaştırma metodu kullanılarak üretilen kaplamalar üzerinde yoğunlaşarak çalışmalar devam edecektir. PECVD cihazındaki sorun çözüldüğünde bu sistemle üretilen filmler üzerinde kristallenmenin optimizasyonuna devam edilecektir.

#### 4.2.3. Farklı Dielektrik Ara Katmanların Lazer Kristallendirmeye olan Etkileri

Farklı ara tabakalı 650 nm a-Si, yukarıda belirtilen  $2,6 \text{ J/cm}^2$  lazer akısı ve  $40 \mu\text{m}$  odak çapı ve  $23 \text{ mm/s}$  tarama hızı ile  $12 \text{ mm}$  dairesel olarak taranmıştır. Bu tarama sonucunda Şekil 4.26'da gösterilen kristal yapılar elde edilmiştir. Elde edilen yapıların Raman spektroskopisi analizleri de Şekil 4.27'de verilmektedir.

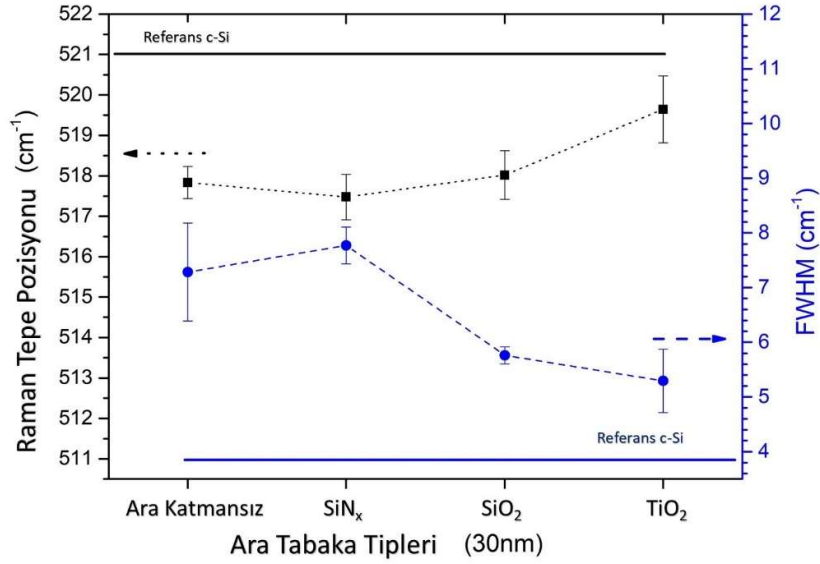


Şekil 4.26. Lazerle elde edilen kristal yapılar



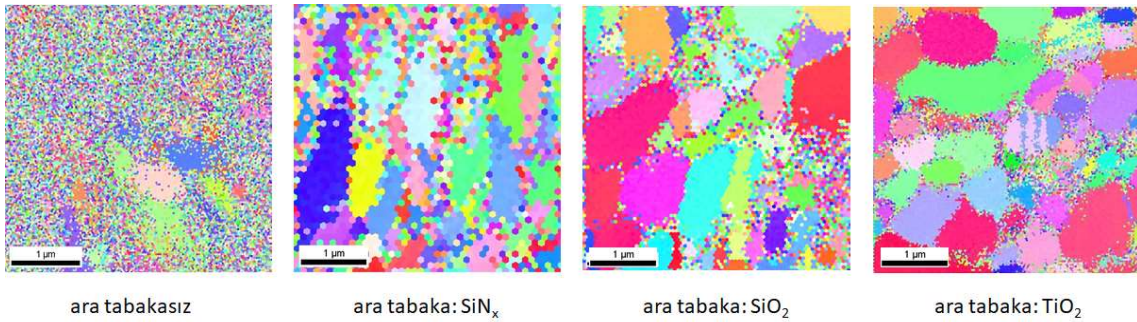
Şekil 4.27. Kristallendirilen filmlere ait Raman kayması tayfları





**Şekil 4.28.** Kristallendirilen filmlere ait Raman analizi

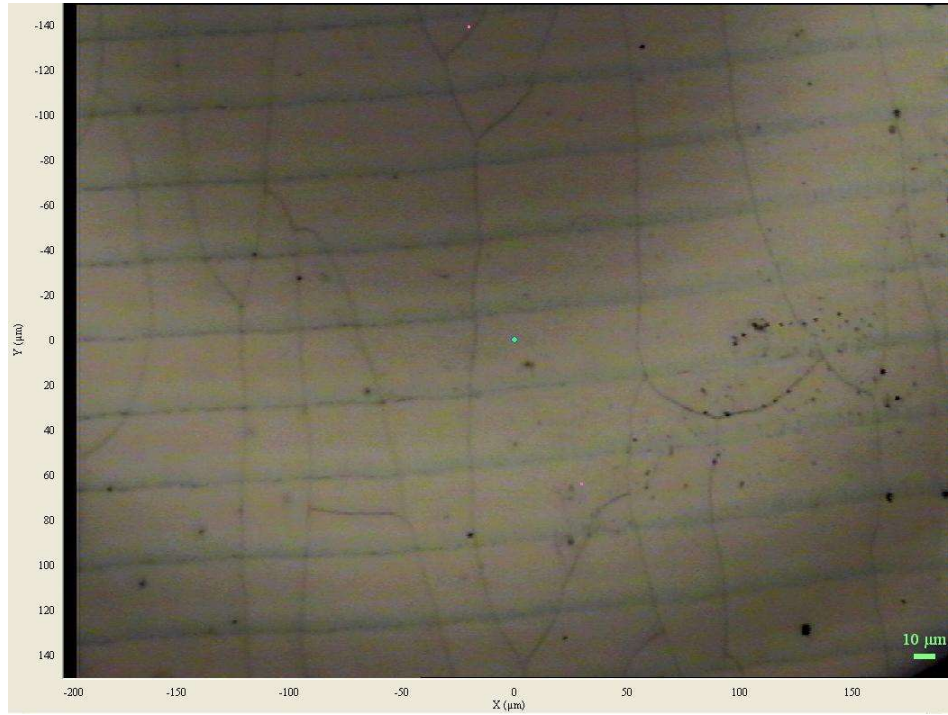
Şekil 4.28’de görüldüğü üzere yapılan lazer kristallendirme sonucunda SiO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub>’li ara tabakalara sahip örnekler referans kristal Silisyum (c-Si)’un Raman analizlerine yakın sonuçlar vermektedir. Bundan sonra yapılacak deneylerde bu ara tabakaların kullanımına öncelik tanınacaktır. Raman analizlerine ek olarak farklı ara tabakalara sahip örnekler elektron geri saçılım kırınımı (electron back scatter diffraction - EBSD) analizine sokulmuş mikro kristal bölge büyüklükleri araştırılmıştır. Şekil 4.29’da bu analizlerin sonuçları bulunmaktadır. Farklı renklerde olan bölgeler farklı kristal yönelimlerine sahip mikro boyutlu kristal taneciklerini göstermektedir.



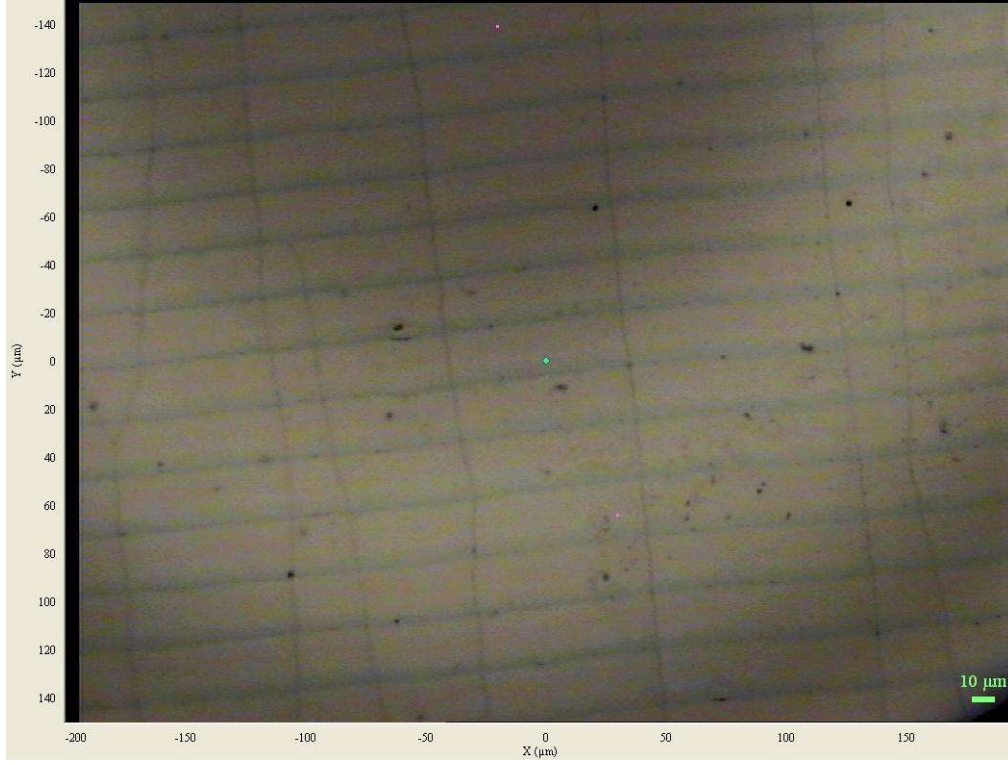
**Şekil 4.29.** EBSD analizi

Ara tabakası SiO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub> olan yapıların kristal taneciklerinin aynı yönelime sahip bölgelerinin büyüklükleri 2-5 µm arası boyutlara ulaşabilmektedir. Bu bilgi bize Raman analizlerinin yapıların kristal kalitelerinin belirlenmesinde öncül ve tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

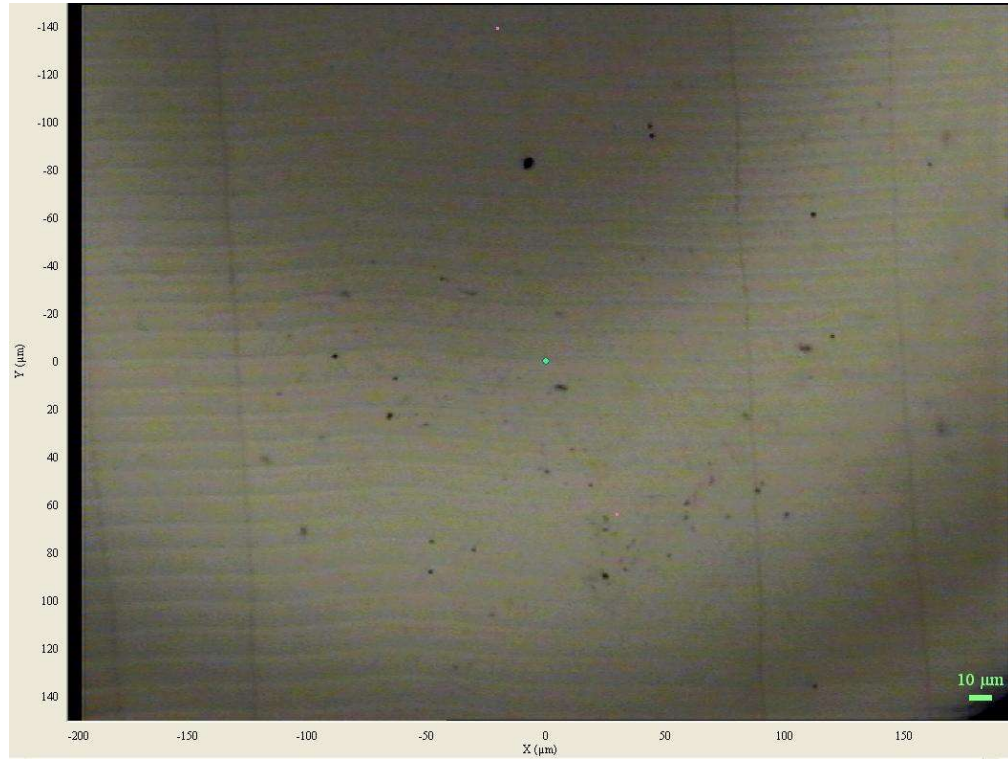
Yapılan ara katman çalışmalarına ek olarak, geliştirilen  $45\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m}$  çizgi odaklı lazer tarama sisteminde lazer atımlarının üst üste binme yüzdelерinin kristallenme ve yüzey yapılarına olan etkileri araştırılmış ve eklemli güneş gözesi yapımında lazer atım üst üste binme yüzdeleri optimize edilmiştir. Bunun için  $950\ \text{nm}$  a-Si filmler doğrudan cam alttaş üzerine e-beam yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplanan yapılar lazer atımı başına  $1,5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 'lik lazer akıları ile ısıtılarak %70, %80, %90 ve %95 'lik üst üste binme yüzdeleri karşılaştırılmış; oluşan kristal tanecik yapıların artan üst üste binme yüzdeleri ile paralel olarak büyüdüğü ve yapısal deformasyonların (çatlak ve atım iz düşümünün izleri gibi...) azaldığı gözlenmiştir.



**Şekil 4.30.** Atım üst üste binme oranı %70 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey

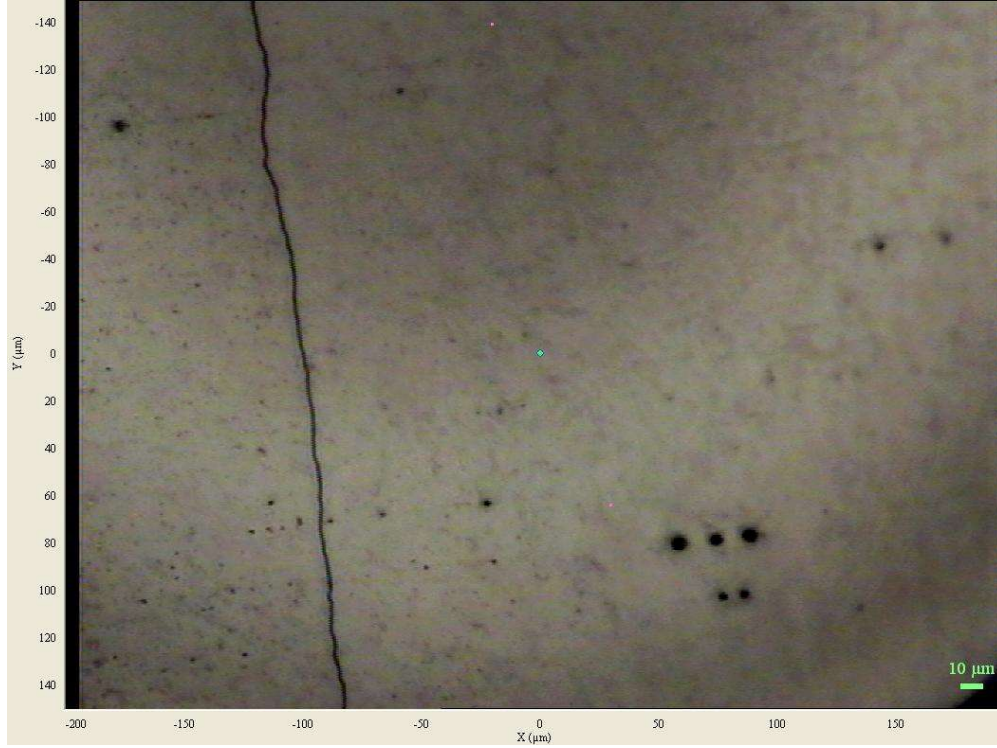


**Şekil 4.31.** Atım üst üste binme oranı %80 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey



**Şekil 4.32.** Atım üst üste binme oranı %90 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey





**Şekil 4.33.** Atım üst üste binme oranı %95 olan lazerle kristallendirilmiş Silisyum yüzey

Yukarıdaki Şekil 4.30 ile 4.33'te, lazerle tarama doğrultuları dikey yöndedir. Şekil 4.30 ile 4.32'de lazer atımının bıraktığı izler belirgin yatay çizgiler şeklinde ardışık olarak devam etmektedir. Şekil 4.30 ile 4.33'den de görüleceği üzere lazer atımlarının bıraktığı izler azalırken, oluşan kristal taneler birleşerek daha büyük kristal bölgeleri oluşturmaktadır. Şekil 4.33'te lazer atımlarının izleri tamamıyla kaybolurken, düzgün genel hatları belirgin büyük kristal bölgeler oluşmaktadır. Çatlak görünümünde kontrast veren dikey çizgilerin hem yönelimleri gitgide belirgin olarak tarama yönüne dönerek görülme sıklıkları üst üste binme oranının artışına paralel olarak azalmıştır. Yüzeyin morfolojisinde iyileştirmenin lazerin atımlarının üst üste binme oranı ile kontrolü sağlanmıştır. Bu çizgileri üzerinde gerçekleştirilen atomik kuvvet mikroskopisi taramaları sonucu çatlak oluşumunu destekleyen bir yükseklik farkı belirlenememiş, çatlak görüntüsünün kristal kusurlarının birikiminden kaynaklandığı ancak fiziksel bir çatlak olmadığı değerlendirilmiştir.

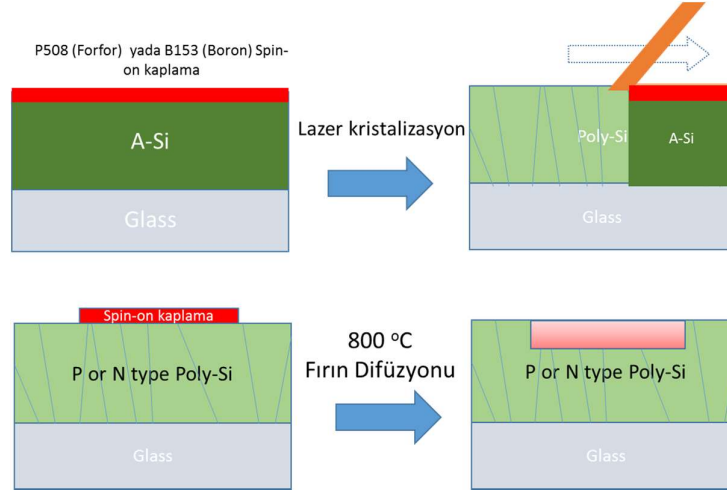
### **4.3. Fotovoltaik Göze Yapıları**

#### **4.3.1. Homoeklem Aygıt Yapıları**

Üretim basamakları ODTÜ GÜNAM'da gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün deneylerde alttaş olarak cam kullanılmıştır. Bu çalışmada  $\text{SiN}_x$  ara tabakası tabakası hem kullanılmış hem de kullanılmayıp Si filmler direkt olarak cam üzerine üretilmiştir. Diğer tüm üretim koşulları iki

durumda da aynı tutulmuştur. Amorf Silisyum (a-Si) üretimi GÜNAM'da bulunan e-beam sistemi ile yapılmıştır. Üretim öncesi kazan basıncı  $2E-7$  Torr oluncaya kadar beklenmiştir. Üretim esnasında 100-110 mA akım kullanılarak yaklaşık 10-15 Å/s hızında Si buharlaştırılmıştır. Alttaş sıcaklığı  $250^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Bu koşullarda 950 nm katkısız a-Si filmler üretilmiştir. Filmler katkılanacağı için FILMTRONIC firmasından temin edilen fosfor (P508) ve boron (B153) solüsyonları spin kaplama yöntemiyle örneklerin üzerine homojen bir şekilde kaplanmıştır. P508 içerisinde 8% fosfor ve B153 içerisinde de 4% oranında boron bulunmaktadır. Kaplama işlemi 500 RPM hızla 5 saniye ve sonrasında 3000 RPM hızla 20 saniye olarak ik basamaklı uygulanmıştır. Sonrasında  $200^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 10-15 dk tutularak kaplamanın sıvı kısmı buharlaştırılmıştır. Soğurucu poly-Si tabakayı elde etmek için örnekler lazer ile kristallendirilmiştir. Uygun kristalizasyon parametrelerini belirlemek için farklı güçlerde lazer ile kristallenme denemeleri yapılmıştır. Burada kullanılan lazer tarama hızı lazerin atım frekansı sabit tutulmuştur. Lazer taraması bir çizgi üzerinde 23 mm/s tarama hızı ile 100 kHz atım sıklığı ile tarama yapmıştır. Yapılan taramada örnek lazerin çizgi odağına yerleştirilmiş olup taramada oluşturulan çizgi odak  $40\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m}$  ölçülülerinde çarpıtılmış bir elips şeklindedir. Odağın lazer tarafından adınlatılan yerinde ışık şiddeti Düz tepe Gaussyan şeklindedir. Kristalizasyon için sadece odakta oluşan enerji atımlarının miktarını ayalamak için lazerin ortalama güç değerleri değiştirilmiştir. Kristalizasyon sonrası örnekler %10'luk Hidroflorik (HF) asit çözeltisinde çok kısa süreli olarak temizlenmiştir. Soğurucu tabaka elde edildikten sonra yayıcı (emitter) tabaka üretimine geçilmiştir ve yukarıda da bahsedildiği şekilde yine spin-on kaplama yöntemi uygulanmıştır. P-tipi soğurucu tabakalara n-tipi ve n-tipi soğurucu tabakalara da p-tipi yayıcı tabakalar olacak şekilde kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplama uygulanmadan önce yaklaşık boyutları  $15 \times 15\ \text{mm}^2$  olan örneklerin yüzeylerinin bir kısmı termal bant ile kapatılarak maskelenmiştir. Bunu yapmaktaki amaç soğurucu ve yayıcı tabakalardan elektriksel ölçüm yapabilmektir. Örnekler kaplandıktan sonra yine  $200^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 10-15 dk ısıtılmış ve bantlar çıkartılarak  $800^{\circ}\text{C}$ 'de azot akışı altında 10 ve 20 dk sürelerince tavlanmışlardır. Cam alttaş kullanıldığı için  $800^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkılamamıştır. Tavlama sonrası örnekler yine seyreltik HF çözeltisinde temizlenmiştir. Örneklerin kristallenmeleri Raman spektroskopisi ile incelenmiş ve aynı zamanda mikroskop görüntüleri alınmıştır. Elde edilen güneş hücresi yapılarının voltaj özellikleri  $Suns-V_{oc}$  ölçümleri ile incelenmiştir.

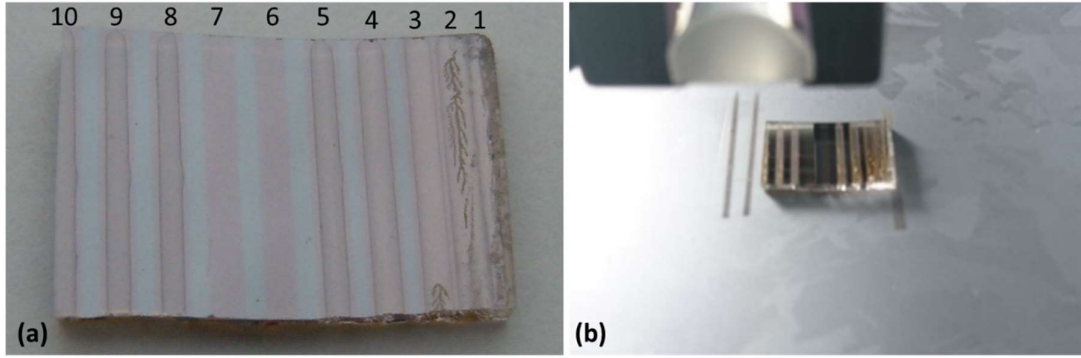
Şekil 4.34'de yapılan işlemlerin şematik gösterimi verilmiştir:



**Şekil 4.34.** Güneş hücresi üretiminin şematik anlatımı

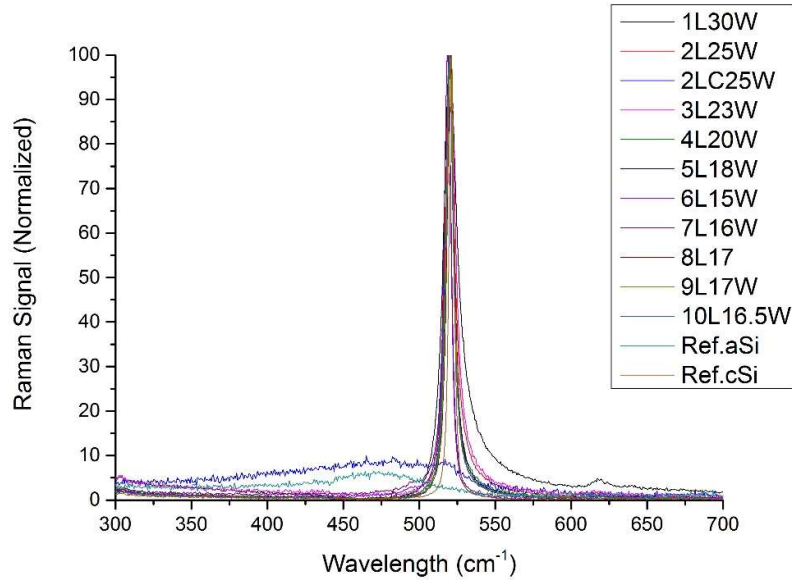
Yapılan çalışmalarda homoekelem, yapıların güneş gözesi oluşturmak için yeterli voltaj ve akım üretmediği gözlemlenmiştir. Bunun yerine yapılan yapıların daha kontrollü p-n eklemi oluşturabilmesi yapıyı daha kontrollü bir şekilde oluşturmak için heteroekelem güneş gözeleri tasarlanmıştır. Bu tasarımlar “4.3.2 Heteroekelem Aygıt Yapıları” başlığı altında ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Heteroekelemlı güneş gözesi yapımına geçmeden önce soğurucu tabakayı oluşturmak için a-Si film üzerinde birtakım lazer kristalizasyon denemeleri yapılmıştır. Çünkü kalınlık ve üretim yöntemi değıştikçe uygulanması gereken lazer gücü de değışmektedir. Film kalınlığı değıştikçe emilen enerji de değışmektedir ve dolayısı ile yüzeyde biriken enerji fazlalığı filmin çatlaklar oluşturarak alttaştan ayrılmasına sebep olabilmektedir. Buna karşılık, yeterli enerji soğurumu sağlanamazsa verimli kristalizasyon elde edilemeyebilir. Bu bilgiler ışığında aynı örnek üzerinde çeşitli lazer güçlerinde lazer taraması yapılarak kristalizasyon elde edilmiştir ve bu kristallenen bölgeler incelenmiştir. Şekil 4.35’de farklı güçlerle taranan a-Si örneği görölmektedir. Çalışmanın bu kısmından sonra yapılan lazer taramaları 1 mm çizgi odaklı tarama optiğı ile yapılmıştır. Taramalar çizgi odağın uzun eksenine dik olarak lazer ışını yüzeye dik düşürölerek yapılmıştır. Şekil 4.35’de taranan bölgeler açıkça görölmektedir ve taramalar lazer ışığının şeklin üstünden altına doğru dikey doğrultuda yapılmıştır. Çizgi odak oluşturmak için silindirik mercekten faydalanılmıştır.



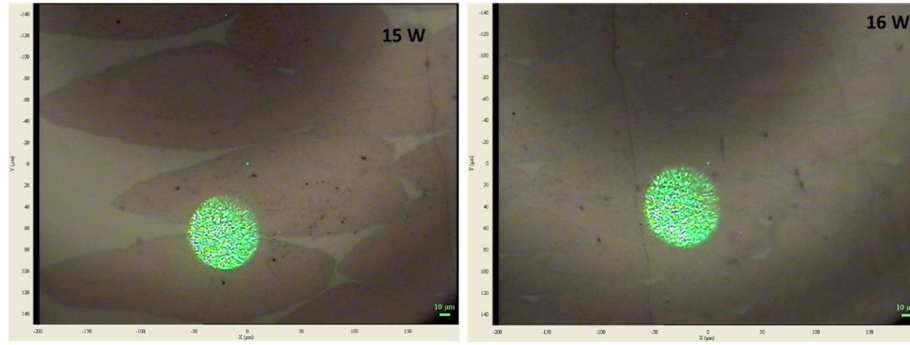
**Şekil 4.35.** Farklı güçlerle taranan a-Si örneği

Şekil 4.35'deki çizgilerin her biri farklı bir lazer gücüyle taranmış bölgeyi göstermektedir ve taranan bölgeler numaralandırılmıştır. Aralarda kalan gri bölgeler ise a-Si bölgelerdir. Şekil 4.35'deki iki resimde de aynı örnek görülmektedir. 15 W ile 30 W arasında farklı güçler kullanılmıştır. Örneğin üzerindeki desenlerden de anlaşılacağı üzere bazı bölgeler daha açık renkli görünmektedir. Buralarda kristalizasyon sağlanmışsa da filmlerde deformasyon gözlemlenmiştir. Örneğin sağ ucunda kullanılan lazer taraması diğer bölgelere göre daha yüksek güçler kullanılarak yapılmıştır ve çatlamlar açıkça görülmektedir. Bütün taramaların kristalizasyonları Raman ölçümleriyle de incelenmiştir. Şekil 4.36'da farklı lazer güçleriyle elde edilen kristalizasyonların Raman analizleri verilmektedir.



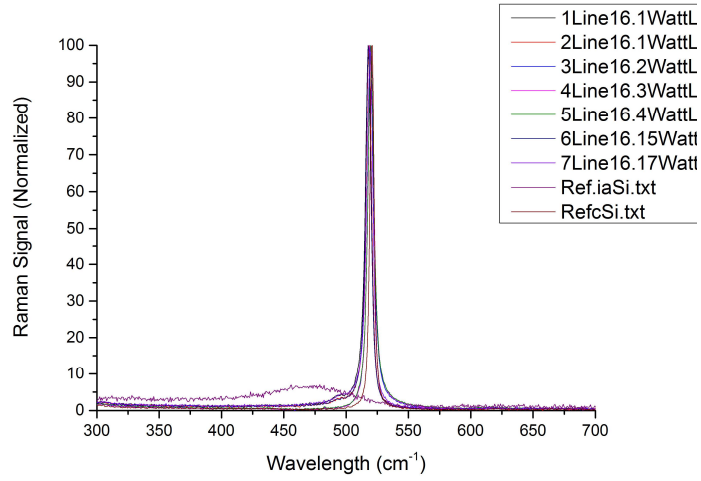
**Şekil 4.36.** Farklı lazer gücüyle elde edilen poly-Si yapıların Raman analizleri

Şekil 4.36'daki grafikte farklı lazer enerjileri ile kristallenen bölgeler Şekil 4.35'deki numaralara aittir. Aynı zamanda referans olması açısından a-Si ve c-Si (wafer) Raman ölçümleri de verilmiştir. Görüldüğü üzere, yapılan taramalar sonucunda yüksek miktarlarda kristallenme elde edilmiştir. Fakat Raman sonuçlarından elde edilen kristallenme bilgileri filmlerin stabilitesi hakkında çok net bilgi vermemektedir. Onun için optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bunun yanında bu örnek cilalama (polishing) cihazında da test edilmiştir ve özellikle yüksek enerji ile üretilen 1, 2 ve 3. bölgelerde elde edilen poly-Si filmlerde soyulmalar gözlenmiştir. Bu koşullarda en iyi film özelliklerini 6. ve 7. taramalar vermektedir. Bu iki taramanın Raman yarı yükseklikteki tam genişlikleri (FWHM) de azdır. Fakat, 7. taramada biraz daha az gözükmemektedir. Aynı zamanda cilalama testinde de oldukça iyi stabilite sergilemişlerdir. Bu iki lazer gücünü kıyaslamak için taramaların optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir (Şekil 4.37).



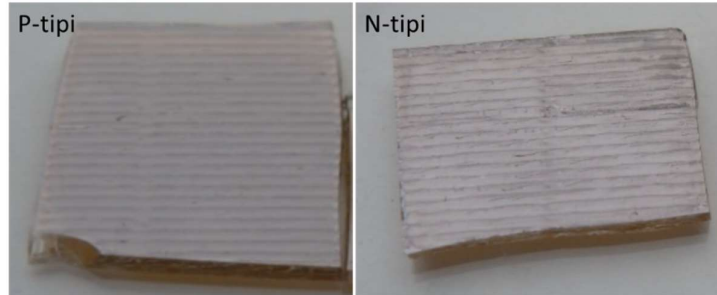
**Şekil 4.37.** 15 W ve 16 W lazer taramalarıyla elde edilen poly-Si yapıların optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.37'de görüldüğü gibi kahverengi kısımlar kristal bölgeleri göstermektedir. 16 W ile elde edilen taramada 15 W ile elde edilene göre, a-Si bölgeler olsa bile, daha fazla kristallenmiş bölgeler bulunmaktadır. Dolayısı ile bundan sonrası için 16 W enerji taramasına odaklanılmıştır. Bu bilgilere dayanarak 16,0 W ile 16,4 W taramalar yapılmıştır. Bu taramalar sonucu elde edilen poly-Si tabakaların Raman ölçümleri Şekil 4.38'de verilmektedir.



**Şekil 4.38.** 16 W ve 16.4 W enerji aralığında elde edilen poly-Si tabakaların Raman analizleri

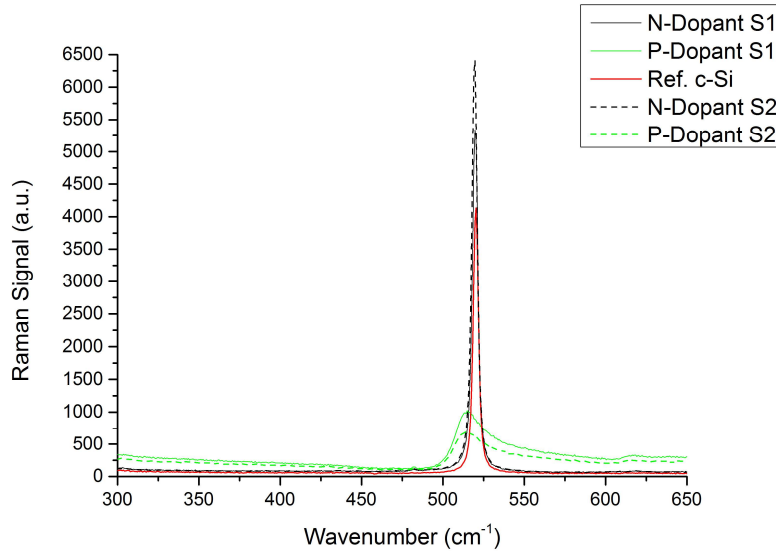
Burada 16W, 10 W ve 16,20 W aralığında daha çok durulmuştur. Çünkü, diğer enerji değerlerinde film yüzeyine bant yapıştırıldığında filmlerde yine soyulma gözlenmiştir. Bu bağlamda en iyi sonucu 16,15 W enerji değeri vermiş ve yapılan optimizasyon çalışmaları ışığında bu değer ile elde edilen kristalizasyonun en uygun çalışma enerjisi olduğu sonucuna varılmıştır. Güneş gözesi yapımında soğurucu tabakalar bu enerji kullanılarak elde edilmiştir. P-tipi ve N-tipi spin kaplama sonrası yapılan kristalizasyon ile Şekil 4.39'daki örnekler elde edilmiştir.



**Şekil 4.39.** P-tipi ve N-tipi poly-Si soğurucu tabakalar

Görüldüğü gibi oldukça homojen film yüzeyleri elde edilmiştir. Bu örnekler cilalama makinesiyle test edilmiştir ve herhangi bir soyulma gözlenmemiştir. Buna ek olarak kristallenme+katkılama sonrası hem P-tipi hem de N-tipi örneklerin Raman analizleri yapılmıştır (Şekil 4.40).





**Şekil 4.40.** P-Tipi ve N-Tipi soğurucu tabakaların Raman analizleri

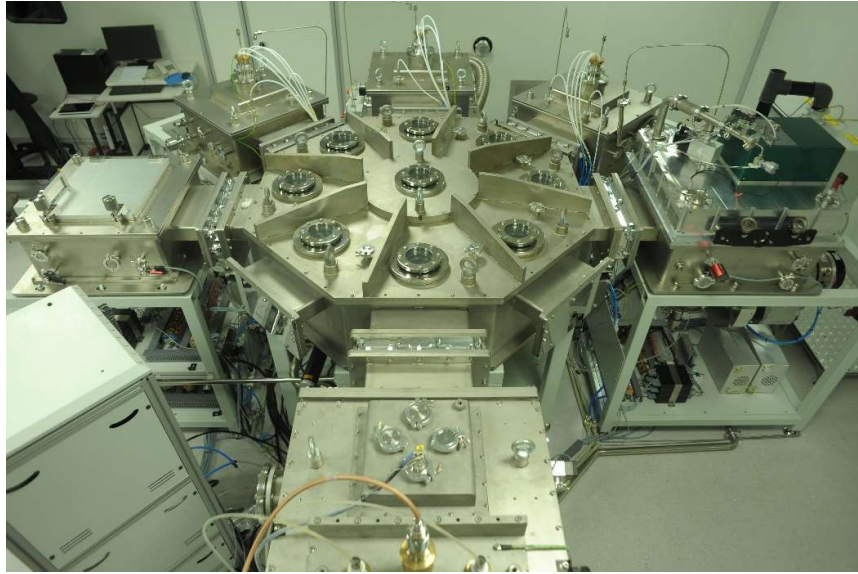
Şekil 4.40'daki Raman ölçümlerine bakıldığında N-Tipi örneklerin FWHM değerleri yaklaşık olarak aynı gözükmekte ve c-Si referans değerine de oldukça yakındır. Buna ek olarak malzemelerde gerilim (stres) de neredeyse yoktur. Bu da kristallenmenin katkılamaıyla birlikte oldukça kaliteli olduğunu göstermektedir. P-Tipi örneklerin Raman ışık şiddetinde hatırı sayılır bir düşme olduğu; bunun yanında Raman sinyalinde bir bozulmanın olduğu gözükmemektedir. Raman sinyalindeki düşüşü amorf silisyum Raman sinyaliyle karşılaştırılmasıyla durumun bir anomaliye işaret ettiği gözükmemektedir. Burada oluşan duruma ek, sinyalde asimmetrik bir genişleme de gözükmemektedir. Bu durum daha detaylı incelenmeden kesin bir yargıya varmak yanlış olacaktır. Fakat sinyal kristallenmenin başladığını ama yeteri kadar oluşmayıp meta faz durumda kaldığına işaret etmektedir. Bundan sonraki aşama ise Şekil 4.41'de (alt) gösterilen, yine spin-on kaplama ile, yayıcı tabaka üretimidir. Bunun için örneklerin orta kısımları boş bırakılarak kenarlar bant ile kapatılmış ve spin-on kaplama yapılmıştır Spin-on kaplamaların sıvı kısmının buharlaşması için örnekler 200 °C'de tavllanmış ve difüzyon için fırına koymadan önce bantlı kısımlar kaldırılmıştır. Burada bantların filmleri kaldırdığı görülmüştür (Şekil 4.40). Bunun en temel nedeni ise sıcaklığa maruz kalan filmlerin alttaş ile arasında gerilim oluşarak soyulma olmuştur.

Bu durumdan şu anlaşılmaktadır; filmlerin kendi içinde gerilim yok denecek kadar azdır ama lazer kristalizasyon sonrası filmlerin yüzeye tutunmaları azalmakta ve sıcaklıkla bu durum daha fazla artmaktadır. Bant ise, çıkartılırken filmi kaldırabilecek kadar kuvvet uygulamaktadır. Şekil 4.40'da ortadaki koyu bölge yayıcı tabakadır. Filmlerin kalkmasına rağmen yine de örnekler difüzyon için 800°C'de tavlannmıştır. HF temizliği sonrasında  $Suns-V_{oc}$  ölçümü alınmış

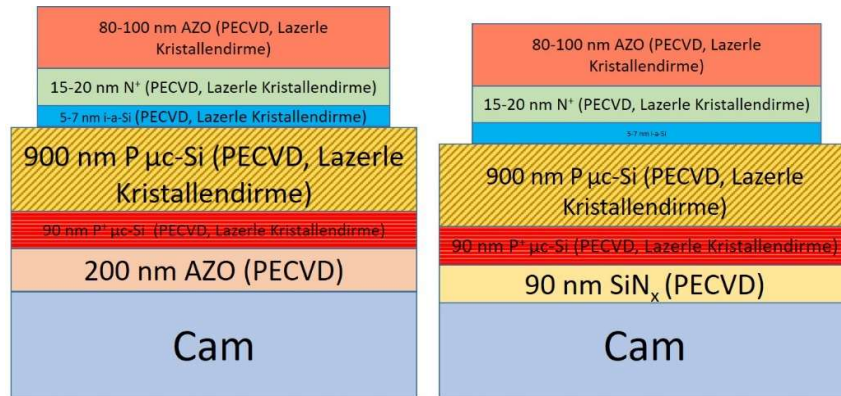
fakat herhangi bir voltaj okunamamıştır. Burada filmlerin yüzeyden kalkmasının yanında yayıcı tabaka difüzyonunda sorun olabilir. Eğer katkılama için süre ve sıcaklık yeterli değil ise p-n eklemi elde edilememiş olabilir. 800°C sıcaklık standart güneş hücresi üretiminde fosfor ve boron katkılama için normal olarak yeterli değildir. Fakat burada kullanılan alttaş cam olduğu için daha yüksek sıcaklıklara çıkılamamıştır. Ancak, konsept olarak güneş gözesi üretim basamakları uygulanmıştır.

#### 4.3.2. Heteroeklem Aygıt Yapıları

GÜNAM bünyesinde bulunan PECVD cihazı (Şekil 4.41) ile de Şekil 4.42’de şematiği verilen heteroeklem gözelerin üretimine başlanmıştır.



**Şekil 4.41.** GÜNAM Çok Kazanlı PECVD Sistemi

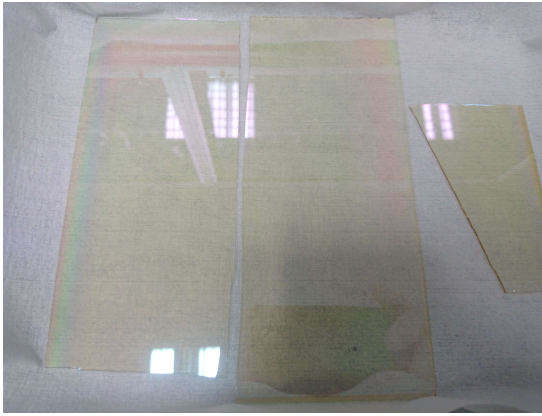


**Şekil 4.42.** Planlanan Güneş Gözesi Aygıt Şeması

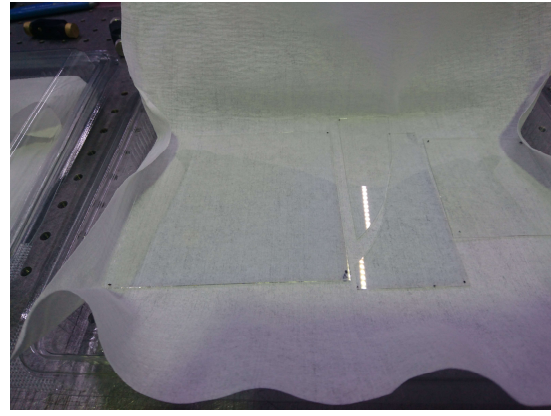


Şekil 4.42’de GÜNAM bünyesinde bulunan PECVD ve e-beam sistemlerinde hazırlanmak üzere tasarlanan güneş göze şeması bulunmaktadır. Şekil 4.42’de belirtilen cam üzerine kaplanan tabakalardan p tipi olanların PECVD ve e-beam sistemleri ile,  $\text{SiN}_x$ , n-tipi ve i-tipi olanların PECVD ile, iletken oksit  $\text{Al:ZnO}$  ise (AZO) alt ve üst elektrot tabakanın ise saçtırma yöntemiyle kaplanmaları planlanmıştır. Kaplamalar camdan yukarı doğru gerçekleştirilecektir. 90 nm  $\text{P}^+$  ve 900 nm P tip a-Si kaplaması PECVD ve e-beam yöntemleriyle tamamlandıktan sonra ODTÜ bünyesinde mevcut, FiberLast tarafından tamamlanan çizgi odak 1064 nm atımlı lazer tarama sistemi ile örnekler taranarak a-Si filmler kristallendirilecektir. Daha sonra tekrar GÜNAM/ODTÜ PECVD sistemi ile sırasıyla üst amorf silisyum katmanlar kaplanıp, PECVD kazanına bağlı bulunan saçtırma kazanında da AZO kontak kaplaması yapılacaktır. Kristal yapıların kenar izolasyonu yine ODTÜ bünyesinde bulunan markalama lazeri ile gerçekleştirilecektir. Böylelikle üretilen poli-Si – amorf Si heteroeklem güneş hücresi teste hazırlanacaktır. Bu 6 aylık dönemde planlanmış olan göze yapılarının üretimleri büyük ölçüde gerçekleştirilmiş olup yalnızca üst kontak katmanı olan AZO kaplaması cihaz arızası nedeniyle eksik kalmıştır. AZO kontak bulunmayan, yalnız cam üzeri pn heteroeklemi bulunan aygıt üretimi raporun hazırlandığı son hafta içerisinde tamamlanmıştır. Bu hücreler üzerinde aygıt ölçümleri yapılmaya başlanmak üzerinedir.

Cihaz arızasından önce gerçekleştirilen test kaplamalarında AZO ve  $\text{SiN}_x$  ara katmanlar karakterize edilebilmiştir. İlk aşamada iki farklı örnek oluşturmak için cam üzerine 200 nm AZO ve 90 nm  $\text{SiN}_x$  iki farklı ara tabakalı kaplama yapılmıştır (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44).

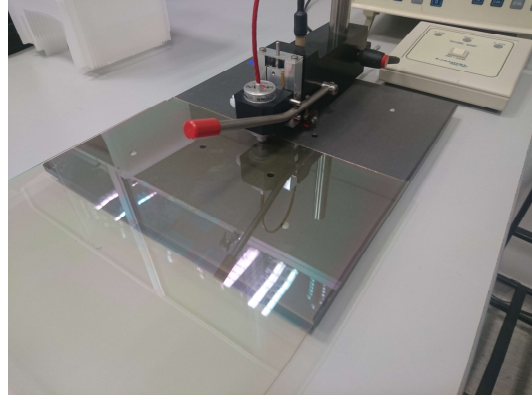


**Şekil 4.43.** Cam üzerine 200 nm AZO



**Şekil 4.44.** Cam üzerine 90 nm  $\text{SiN}_x$

Yapılan kaplamaların iletkenlikleri 4-probe ölçüm metodu ile ölçülmüştür (Şekil 4.45).

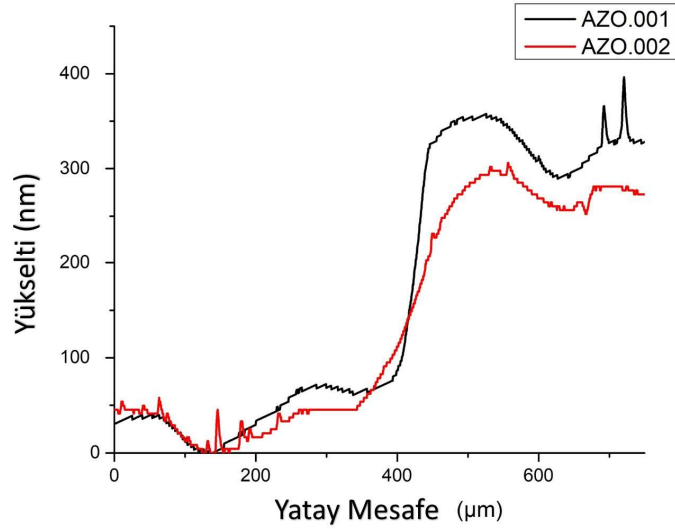


**Şekil 4.45.** 4-Probe iletkenlik ölçümü

Yapılan ölçümlerde  $\text{SiN}_x$  kaplı camda beklediği gibi kontak alınamazken, AZO kaplı camdan  $1,01 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$  iletkenlik okunmuştur. AZO kalınlık değerleri Veeco DEKTAK 6M aleti (Şekil 4.46) ile ölçülmüş ve teyit edilmiştir (Şekil 4.47).



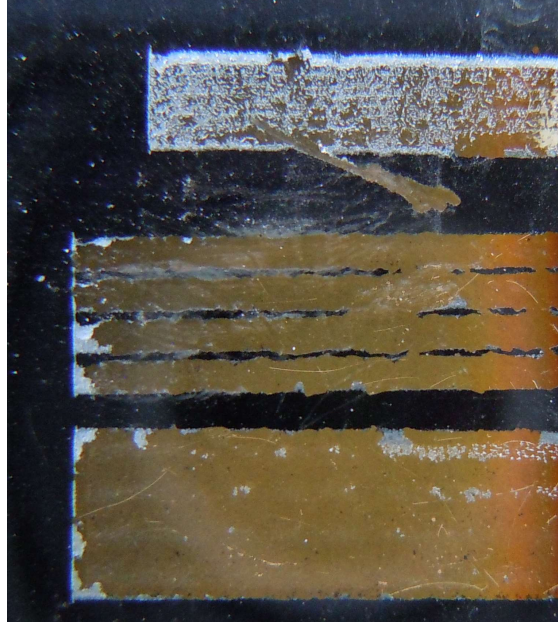
**Şekil 4.46.** Veeco DEKTAK 6M, ODTÜ-GÜNAM



**Şekil 4.47.** AZO kaplamalarının iki farklı noktasından alınan DEKTAK kalınlık profilleri

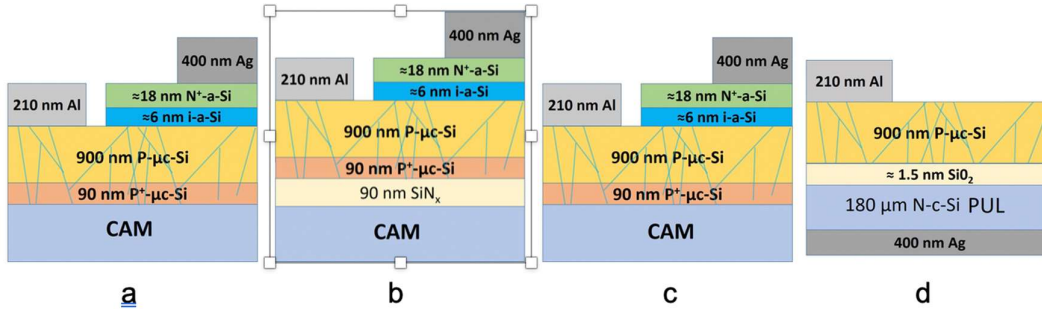
Şekil 4.47’de görüldüğü üzere AZO kaplamalarının (yatayda 400  $\mu\text{m}$ ’den sonra) dikey olarak 200-220 nm’lik yükselti olarak belirmektedir. AZO katmanı üzerine 90 nm  $\text{P}^+$  ve 900 nm  $\text{P}$  a-Si:H katmanları PECVD ile büyütülüp lazer taramaları gerçekleştirildi. Fakat, lazer taramaları sonucunda Si katmanlarında, AZO katmanındaki ısının sebep olduğu deformasyonlardan dolayı kalmalar meydana geldi. Bu nedenle AZO katmanlarının lazerle kristallendirme için uygun olmadığı ve lazer kristallendirme parametrezasyonları yapılamadığından diğer ara

katmanların kullanılmasının güneş gözesi üretimi için daha uygun olacağı anlaşılmıştır (bakınız Şekil 4.48).



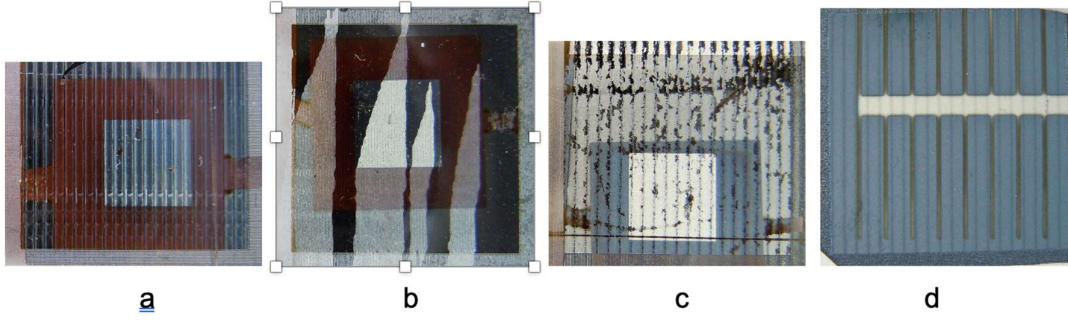
**Şekil 4.48.** AZO kaplamalı a-Si:H kaplı filmin lazer ile kristallendirme denemesi

Şekil 4.42'de tasarlanmış yapılara ek olarak Şekil 4.49'da olan alternatif yapılar da tasarlanmıştır. Şekil 4.49 a ve b tasarımlarında e-Beam metodu ile üretilen yapılara lazer kristalizasyon uygulanmış ardından üst tabakalar PECVD ile kaplanıp metalizasyon yapılmış ve 150°C'de 15 dakika fırınlanmıştır. Bunlara ek olarak Şekil 4.49 c ve d'de bütün katmanlar PECVD ile üretilip diğer işlemler a ve b'dekilerle aynı işlemlere tabi tutulmuşlardır.



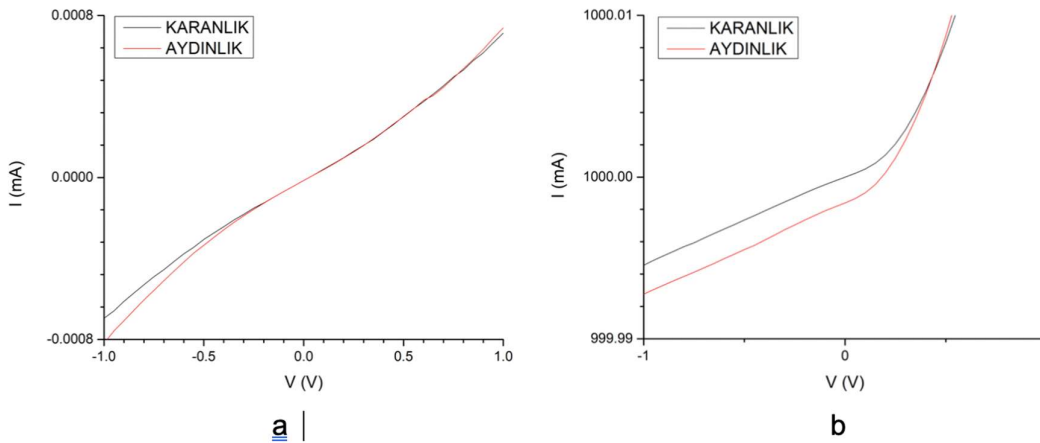
**Şekil 4.49.** a ve b tasarımlarında µc-Si katmanları e-Beam ile, c ve d yapılarındaki µc-Si katmanları PECVD ile üretilip lazer kristallendirme işlemi uygulanmıştır.

Burada oluşturulan yapıların AZO ve SiNx üzerine PECVD ile kaplanan a-Si:H yapılarında lazer kristalizasyon işleminde oluşan deformasyonlardan dolayı bu yapıların güneş gözesi üretimine geçilmemiştir. Güneş gözesi durumuna getirilen yapılar Şekil 4.50'de yer almaktadır.



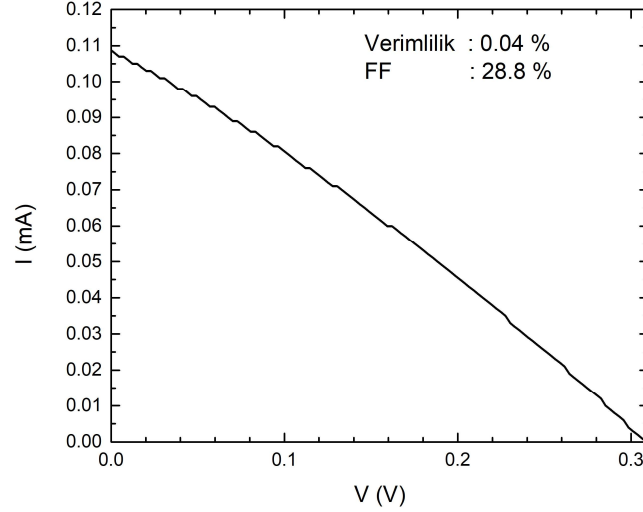
**Şekil 4.50.** a ve b güneş gözelerinde  $\mu\text{c-Si}$  katmanları e-Beam ile, c ve d yapılarındaki  $\mu\text{c-Si}$  katmanları PECVD ile üretilip lazer kristallendirme işlemi uygulanmıştır.

Şekil 4.50 a-c'deki güneş gözelerin çevresinde bulunan açık yerler lazer ile izole edilmiş alanlardır. Bu alanlar gözeyi cam üzerindeki diğer iletken yapılardan ayırmaktadır. Şekil 4.50 d'de bu alan tam belirgin olmamakla birlikte rengi koyu mavi olarak belirmektedir. Bu izolasyon, aynı yöntemle oluşturulmuş birden fazla yapının ortak alttaş üzerinde bulundukları içindir. Ölçümler sırasında aynı alttaş üzerindeki örneklerden bireysel ölçümlerinin doğru yapılmasını sağlamak amaçlıdır. Şekil 4.50 a-c'deki örnekler üzerinde parçalı dikdörtgen şekiller olarak bulunan koyu gri renkli alanlar gözelerin üzerindeki metal kontak alanlarıdır. Akım-voltaj değerleri bu noktalardan kontak alınarak yapılmıştır. Şekil 4.50 d'deki yapıda ise sadece tarak şeklindeki üst kontak gözükmemektedir; diğer kontak örneğin diğer tarafında yer almaktadır. Örnekler karanlık ve aydınlık ortamdaki akım-voltaj (I-V) grafikleri alınarak ve güneş simülasyonuna tabi tutularak karakterizasyonu yapılmıştır. Yukarıda bahsi geçen örneklerden sadece e-Beam ile direkt olarak cam substrat üzerinde oluşturulan ve Si pul üzerinde üretilen güneş gözelerinde ışık duyarlılığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.51'de bu yapıların karanlık ve aydınlık (AM 1.5G Güneş altında) ortamlarda I-V grafikleri mevcuttur.



**Şekil 4.51.** a) e-Beam metodu kullanarak direkt cam üzerinde, b) N-c-Si pul üzerinde üretilen güneş gözesi I-V ölçümleri

Oluşturulan bu yapılarda ışık duyarlılığı gözlenmektedir. Yapıların aynı aydınlık seviyesindeki verimlilik ölçümleri Şekil 4.52'de verilmiştir.



**Şekil 4.52.** e-Beam metodu kullanarak direkt cam üzerinde oluşturulan güneş gözesi

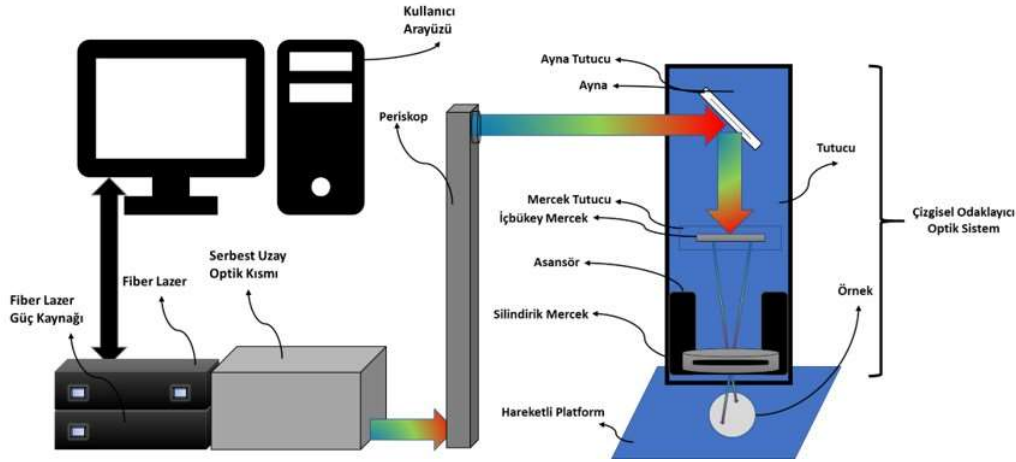
Yapılan çalışmalarda üretilen yapılar literatürde bulunan lazer kristalizasyon ile üretilen ince Si film güneş gözelerine nazaran 10'da birinden daha ince olup lazer kristalizasyonları sırasında ek işlem uygulanmadan üretilen yapılardır. Üretim sırasında lazer işleminde 15 W altında enerji uygulanmıştır. Yapılan çalışmada ışık soğurumu doğal olarak literatürde oluşturulan Si kalınlıklarından azdır. Si katmanın kalınlığı 10 kattan fazla artarsa güneş ışınlarının soğurumu  $e^{10}$  kattan fazla olacaktır; ve bu da verimlilik değerlerine olumlu yönde katkı verecektir. Unutulmamalıdır ki karşılaştırmalar literatür değerlerinde oluşturulan yapıların birim kalınlıklarına karşılık oluşturdukları verimliliklere göre yapılmalıdır.

#### 4.4. Lazer Tarama Sisteminin Geliştirilmesi

Söz konusu proje kapsamında FiberLAST bünyesinde, 3 ana iş paketine ayrılan adımlar ile, 355 nm, 532 nm ve 1064 nm merkez dalga boylarında lazer demet çıkışına sahip bir lazer kristalizasyon sistemi geliştirilmiştir. İlk iş paketi, çizgisel odaklı, 1064 nm dalga boylu, küme modlu bir lazer geliştirilmesini, ikinci iş paketi 532 nm ve 355 nm harmonik üretimlerinin elde edilip, sisteme entegre edilmesini, son iş paketi ise lazer ile ince film işleme aygıtının göze üretimine özelleşmiş bir halde platform olarak prototip halinde üretimini içermektedir. 355 nm ve 532 nm dalga boylarında lazer çıkışının elde edilmesi için frekans katlanması yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin çalışma prensibi, doğrusal olmayan özellikleri olan uygun bir kristal (nonlinear crystal) kullanarak, gönderilen lazerin kesirli katlarında dalga boyuna sahip lazer



demetlerinin üretilmesidir. Bu yöntem ile 532 nm ve 355 nm dalgaboyları elde edilebilmesi için 1064 nm dalgaboyunda çalışan bir lazere ihtiyaç vardır. Projenin 3.1. iş paketinde 1064 nm dalgaboyunda çalışan bir lazer geliştirilmesinin bir sebebi de budur. Bunun dışında sistemin kristalizasyon işlemini yapabilmesi için bir örnek işleme düzeneğine ihtiyacı vardır. Bahsedilen sebeplerden ötürü, 1064 nm dalgaboyunda bir fiber lazer, 355 nm ve 532 nm lazer demetlerinin oluşturulması için ve bu dalgaboylarındaki lazer demetlerinin çizgisel olarak odaklanması için serbest uzay optiği bölgesi, kristalizasyon işlemi için de örnek işleme düzeneği içeren bir lazer kristalizasyon sistemi tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. 3.3 iş paketinde belirtilen prototip sistem, örnek işleme düzeneğini, fiber lazerin güvenli çalışması için gerekli elektronik güvenlik önlemlerini ve kullanıcı kontrolü için gerekli arayüzü içermektedir. Tüm sistemin şematik gösterimi Şekil 4.53'de verilmektedir.



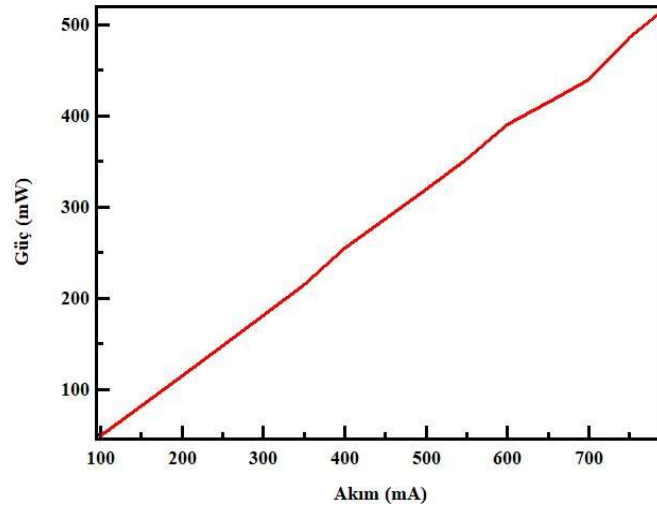
**Şekil 4.53.** Lazer Kristalizasyon Sisteminin Şeması

Bu proje kapsamında optik güç ölçümleri için Thorlabs'ın S302C ve S314C model numaralı termal detektörleri kullanılmıştır. S302C modeli 2W ortalama gücün altındaki değerlerin ölçümü için, S314C modeli ise 2W üzerindeki güçlerin ölçümü için kullanılmıştır. Elektronik sinyal ölçümleri için ise Teledyne Lecroy'un örnek işleme (sample rate) değeri 20 GS/s olan WaveRunner 625Zi model numaralı osiloskobu kullanılmıştır.

### **İş Paketi 3.1.**

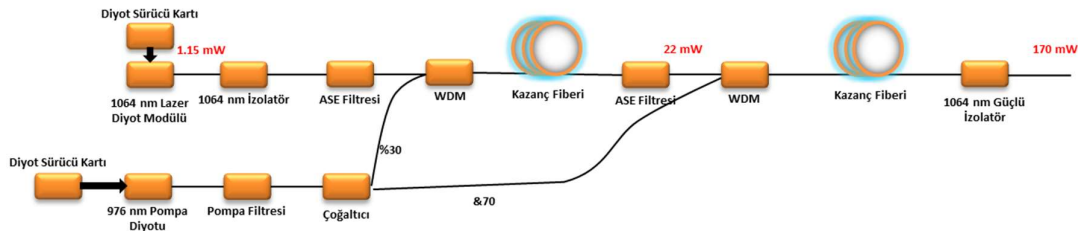
Söz konusu iş paketine göre gerçekleştirilen ve tüm sistemin temelini oluşturan kısım, 1064 nm dalgaboyundaki fiber lazerdir. Gerçekleştirilen bu fiber lazer mimarisi bir adet ön yükselteç ve iki adet yükselteçten oluşmaktadır. Yükselteçlerden biri ara yükselteç, diğeri ise yükselteç olarak adlandırılmıştır. Frekans katlanması yöntemi için kullanılacak kaynak lazerin dar bir bant aralığına sahip olması, kullanılacak doğrusal olmayan kristallerin uzunluğuna bağlı olarak elde edilen dalgaboyu çevriminin verimliliği açısından çok önemlidir. Bunu sağlamak için optik tayf

genişliği 0.3 nm olan 1064 nm dalgaboyunda ve nanosaniye atım üretebilen bir lazer diyod sinyal diyodu olarak seçilmiştir. Atımlı (pulsed) alışma modunda azami 2 A akım ile sürülebilen sinyal diyotu, 1.8 A akım ile sürülmüş ve bu diyotun fiber çıkışından okunan optik güç, 100 kHz tekrar frekansı ve 15 ns atım uzunluğunda, 1.15 mW olmuştur. 1064 nm dalgaboyundaki sinyalin modüle edilerek üretildiği bu kısımda, fiberlerin birbirleriyle ek yerlerinden gelen geri dönüşlerden, doğrusal olmayan etkilerden (nonlinear effect), ileri ve geri yönlü oluşan ASE'den (Amplified spontaneous emission - yükseltilmiş kendiliğinden yayınım) sinyal diyotunu korumak için ASE filtreleri ve optik izolatörler kullanılmıştır. Optik izolatör ve ASE filtrelerinin mevcut giriş kayıpları dolayısı ile 0,87 mW'a azalan güç, ön yükselteç devresinde 600 mW'lık SM pompa diyotu ile pompalanarak 22 mW'a yükseltilmiştir. Burada pompa olarak kullanılan diyotun akım-güç grafiği şekil 4.54'de verilmiştir.



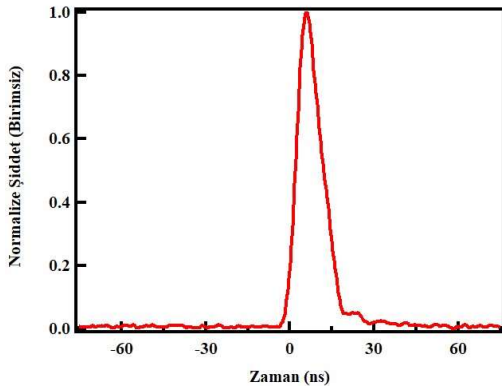
**şekil 4.54.** Ön Yükselteçteki Pompa Diyotunun Güç Akım Grafiği

Projedeki güç hedefi 20 W olup bu güce 22 mW sinyal ile tek seferde erişmeye çalışmak, daha önce tasarlanan sistemlerden elde edilen tecrübelerle istinaden, sistemin güvenilirliğini (reliability) azaltan ve uzun süre sorunsuz çalışmasını engelleyen bir durum oluşturur. Bu sebepten ötürü, ön yükselteç devresine ek olarak ikinci bir ön yükselteç devresi tasarlanmış olup bu şekilde sinyalin gücü 170 mW'a yükseltilmiştir. şekil 4.55'de söz konusu ön yükselteç devresi görülmektedir.

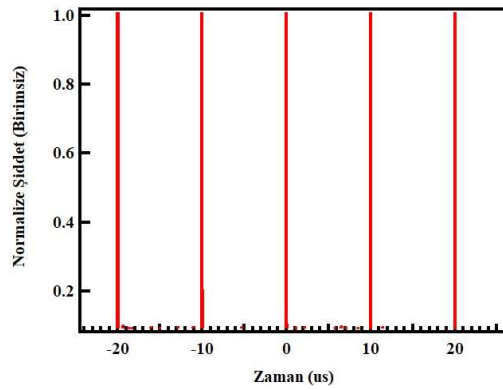


#### Şekil 4.55. Ön Yükselteç Mimarisi

Ön yükselteci oluşturan elektronik ve fiberoptik elemanlar sırasıyla, sinyal diyotu, sinyal diyotunu süren diyot sürücü kartı, sinyal diyotunu geri dönüşlerden koruyacak olan fiberoptik izolatör, ASE'den koruma sağlayabilmek için fiberoptik ASE filtresi (bandpass filtre), ön yükselteçteki sinyal ile 980 nm dalgaboyunda çalışan fiberoptik pompa diyotundan gelen lazerin birleştirilmesini sağlayan fiberoptik dalgaboyu birleştirici (WDM) ve sinyali yükseltmek için gerekli fiber çıkışlı 980 nm pompa diyotu, pompa diyotunu sürmek için diyot sürücü elektroniği, pompa diyotunu geri dönüşlerden korumak için gerekli koruyucu fiberoptik filtre, pompanın sinyal ile birleştirilmesi için WDM ile birleşen fiberoptik çiftleyici, kazanç fiberi, yeni bir ASE filtresi, çiftleyicinin %70'lik bacağından gelen 980 nm dalgaboyundaki pompanın, sinyalle birleştirilmesini sağlayan yeni bir WDM, % 70'lik bacağından gelen 980 nm dalgaboyundaki pompayı 1064 nm lazer dönüşümü için gerekli kazanç fiberi ve ön yükselteci daha sonraki yükselteçlerden gelebilecek geri dönüşlerden koruyacak olan yüksek güçlü fiberoptik izolatör olmaktadır. Ön yükseltecin çıkışındaki 170 mW'lık güce sahip sinyalin, bir fotodetektör ve osiloskop yardımı ile gözlenen tek bir atımı Şekil 4.56'da, sinyalin periyodu ise Şekil 4.57'de gösterilmektedir.



Şekil 4.56. Ön Yükselteç Çıkışından Elde Sinyalin Atımı



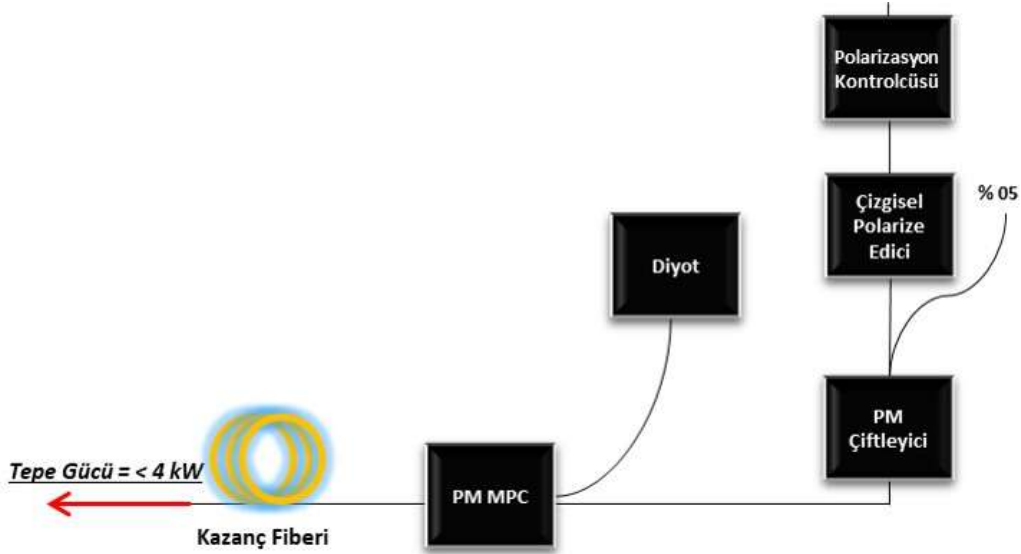
Şekil 4.57. Ön Yükselteç Çıkışından Elde Edilen Sinyalin Periyodu

Şekil 4.56'da görüldüğü gibi atımın süresi yaklaşık olarak 15 ns olup, Şekil 4.57'de görüldüğü üzere atımlar arası geçen süre yani atım frekansı 100 kHz (10  $\mu$ s) olmaktadır. Buraya kadar tek kipli fiber ve fiber optik elemanlar kullanılmış olup daha yüksek güçlere çıkabilmek için LMA (Large Mode Area-Büyük Mod Bölgesi) olarak adlandırılan ve daha yüksek güçlere ve daha yüksek pompa güçlerine dayanıklı fiberler kullanılmıştır.



Sinyal diyotundan çıkan sinyal, kutuplu (polarized) bir şekilde çıkmaktadır. Ancak, ön yükselteç devresindeki fiberler ve fiber optik elemanlar PM (Polarization Maintaining-Polarizasyon Koruma) özelliğine sahip olmadığı için bu kısımlarda ışığın kutuplanması bozulmaktadır. İki yükselteçte de PM özellikli fiberoptik elemanlar ve fiberler kullanılacağı için bu kısımlardaki PM fiberlere ve PM optik elemanlara giren sinyalin kutuplanması gerekmektedir. Aksi takdirde, kötü bir şekilde kutuplanmış bir sinyalle, ikincil ve üçüncül harmoniklerin üretiminde verimsiz sonuç elde edilmesi muhtemeldir. Ayrıca bu PM özellikli fiberoptik elemanların fiber ek işlemleri için ayrı bir fiber ek optimizasyonu gerekmiştir.

Kutuplanmanın kontrolü için ara yükselteç ve yükselteçte PM özellikli optik elemanlardan sonra, bir kutup ölçer (extinction ratio meter) ile, sinyalin kutuplanma oranlarının ölçümleri alınmış ve gerekli optimizasyonlar yapılmıştır. Alınan bu ölçümlerde ER (Extinction Ratio - Sönümlenme Oranı) ve P (güç) değerlerine dikkat edilmiş ve  $ER > 14.5$  dB ile  $P > -29.5$  dBm kıstaslarındaki değerler yakalandıktan sonra işlemlere devam edilmiştir. ER ve P için geçerli bu sınır değerleri bize çizgisel kutuplanma veriminin %95 in üstüne olduğunu söylemektedir. Bu da sinyalin kabul edilebilir bir derece kutuplandığını bizlere ifade eder. Ara yükseltecin tasarımını gösteren şema Şekil 4.58'de verilmiştir.



**Şekil 4.58.** Ara Yükselteç Mimarisi

Ara yükselteçte ilk kullanılan komponent, kutuplanma kontrolcüsüdür (polarization controller). Ardından gelen ilk PM fiber optik eleman olan fiberoptik çizgisel kutuplayıcı, optik güce dayanımı en az olan optik elemandır. Bu sebeple, çizgisel kutuplayıcının hemen sonrasına 95/5'lik bir PM çiftleyici konulmuş ve %5'lik bacak üzerinden alınan optik sinyal ile çizgisel kutuplayıcı üzerindeki geri dönüşlerin güç değerleri ve ara yükseltece geri dönüşteki ASE

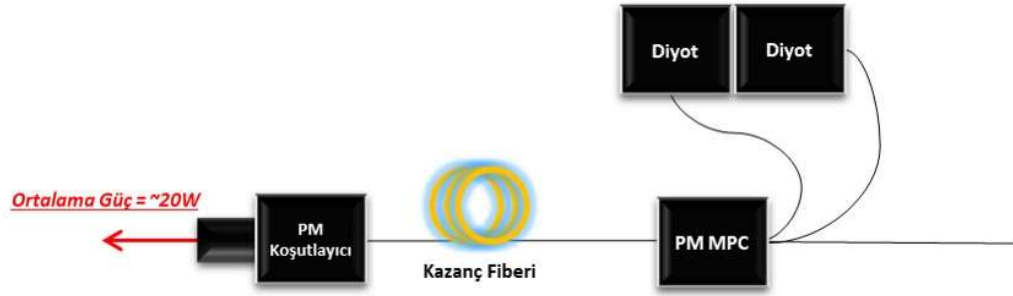
oluşumu gözlenmiştir. PM çiftleyicinin ardından fiberoptik PM birleştirici ve DC (Double Cladding-Çift Kılıflı) PM bir kazanç fiberi gelmektedir. PM birleştiricinin pompa bacağına eklenen 976 nm dalgaboyunda çalışan 18 W'lık dalgaboyu sabitlenmiş fiberoptik diyot ile ara yükseltece gelen sinyal yükseltilmiştir. Daha pahalı olmasına rağmen dalgaboyu sabitlenmiş fiberoptik diyotların kullanılmasındaki ana sebep, ortam sıcaklığının ve sürücü akım değerlerinin değişmesi ile dalgaboyunun kaymasının engellenmek istenmesidir. Optik sinyal gücünün artmasına bağlı olarak kazanç fiberinin çıkışında gözlenen bir takım doğrusal olmayan ve sisteme zarar veren olumsuz etkiler ile karşılaşmış olmakla birlikte, sinyal diyotunun modüle edilmesi ile (atım süresi, tepe gücü ve sinyalin frekansı gibi parametreler değiştirilerek), bu istenmeyen etkiler en aza indirilmiş ve  $\sim 4$  kW tepe güç değerlerine ulaşmak mümkün olmuştur. Bu güç değeri ayrıca, ön yükselteç çıkışından elde edeceğimiz 170 mW'lık sinyal gücünün yaklaşık 17 katına denk gelmektedir. Bu değer de yükseltecin güvenilir ve uzun süreli kararlı çalışabilmesine imkan verecek iyi bir orandır. FiberLAST olarak edinilen tecrübelerle istinaden bir yükselteç için kazanç oranı arttıkça yükseltecin kararlı ve güvenilir çalışma oranı azalmaktadır. Bu sebeple her bir yükseltecin kazancını 100 kattan daha az tutmaya çalışmaktayız.

Sinyal diyotunun optimize edilmiş modülasyon parametreleri, Tablo 4.2' de verilmiştir.

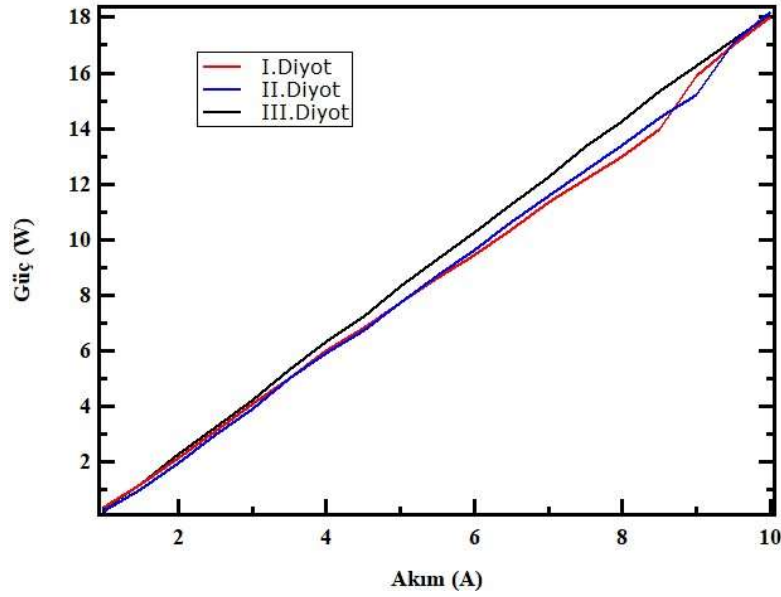
**Tablo 4.2.** Sinyal Diyotunun Atım Modülasyon Parametreleri

Tekrar Frekansı	100 kHz
Atım Uzunluğu	15 ns
Şiddet	400 V <sub>mpp</sub>
Ofset	200 mW
Çıkış Yüğü	50 ohm

Bu kısımdan sonra yükselteç yapımına başlanmıştır. Yükseltecin içeriğinde 976 nm dalgaboyunda çalışan iki adet 18 W dalgaboyu sabitlenmiş diyot, bu diyotları sisteme bağlayan fiberoptik PM birleştirici ve DC PM kazanç fiberi bulunmaktadır. Yükseltecin şeması Şekil 4.59'da görülmektedir. Ara yükselteç ve yükselteçte kullanılan diyotların akım güç grafikleri de Şekil 4.60'da görülmektedir.

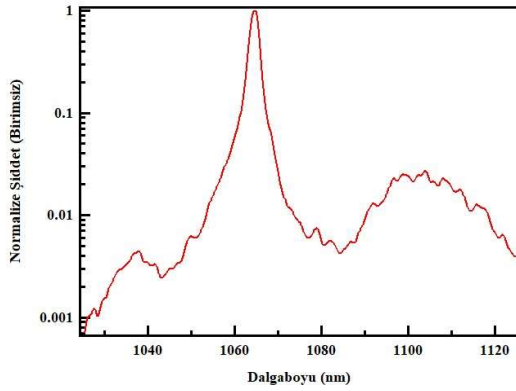


**Şekil 4.59.** Yükselteç Mimarisi

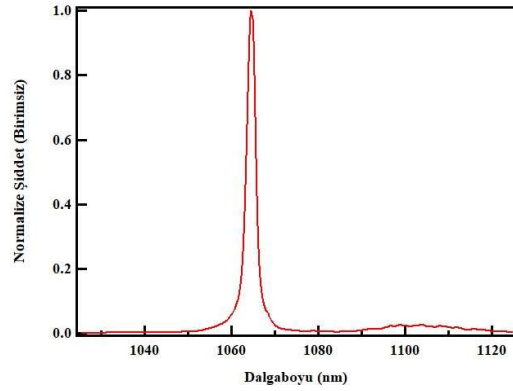


**Şekil 4.60.** Ara Yükselteç ve Yükselteçte Kullanılan Diyetlerin Güç Akım Grafikleri

Yükselteç sonunda bulunan kazanç fiberinin sonuna izolatörlü bir PM fiber optik kollimatör eklenmiştir. Ancak, yükselteçteki pompa diyetleri 4 A mertebelerinden daha yüksek akım ile sürüldüğünde, kolimatör çıkışından elde edilen optik tayfa doğrusal olmayan etkilerle karşılaşmış ve optik tayfın yarı doruk genişliğinin (FWHM- Full Width Half Maximum) 2.5 nm'ye kadar genişlediği gözlemlenmiştir. Genişlemiş optik tayfın logaritmik skalada çizilmiş hali Şekil 4.61'de, çizgisel skalada çizilmiş hali Şekil 4.62'de verilmektedir.

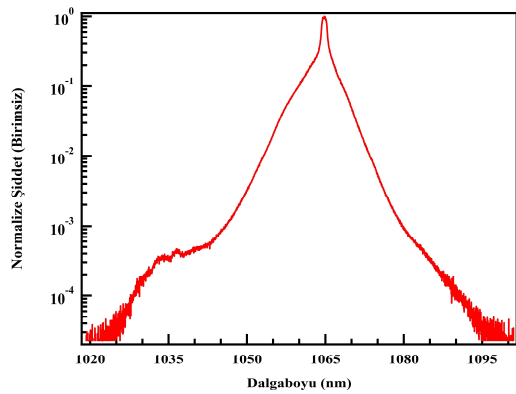


**Şekil 4.61.** Yükselteç Çıkışındaki Doğrusal Olmayan Etkilerin Bulunduğu Optik Tayf (Logaritmik)

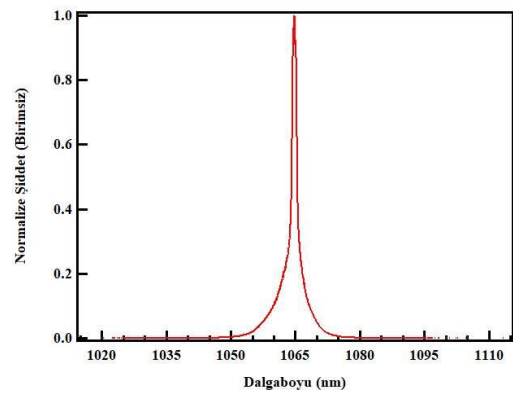


**Şekil 4.62.** Yükselteç Çıkışındaki Doğrusal Olmayan Etkilerin Bulunduğu Optik Tayf (Çizgisel)

Bu durumun minimize edilmesi için kolimatör yerine tek kılıflı pasif 20/125 fiber eklenmiştir ve bu fiberin çıkışından ara yükselteç ve yükselteçte kullanılan kazanç fiber uzunluklarına bağlı olarak optik tayf incelenmiştir. Ara yükselteç ve yükselteçteki kazanç fiberlerinin boylarında gerekli olan kısaltmalar yapıldıktan sonra kolimatör, tekrar PM kazanç fiberinin sonuna eklenmiş ve kolimatörün pasif fiber uzunluğuna bağlı olarak oluştuğu düşünülen, doğrusal olmayan etkilerin minimize edilmesi için kolimatörün pasif fiberi kısaltılmıştır. Doğrusal olmayan bu etkilerin azaltılması, verimli ikincil ve üçüncül harmoniklerin üretilmesinde ve hedeflenen ortalama optik güce ulaşılmasında son derece önemlidir. Sonuç olarak, yükselteç çıkışında bulunan pasif fiberin çıkışından, yarı doruk genişliği 1.35 nm olan tayf aralığı elde edilmiştir. Yaklaşık olarak 20 W ortalama optik güce elde edilen optik tayfın logaritmik skalada çizilmiş hali Şekil 4.63'de, çizgisel skalada çizilmiş hali Şekil 4.64'de verilmektedir.

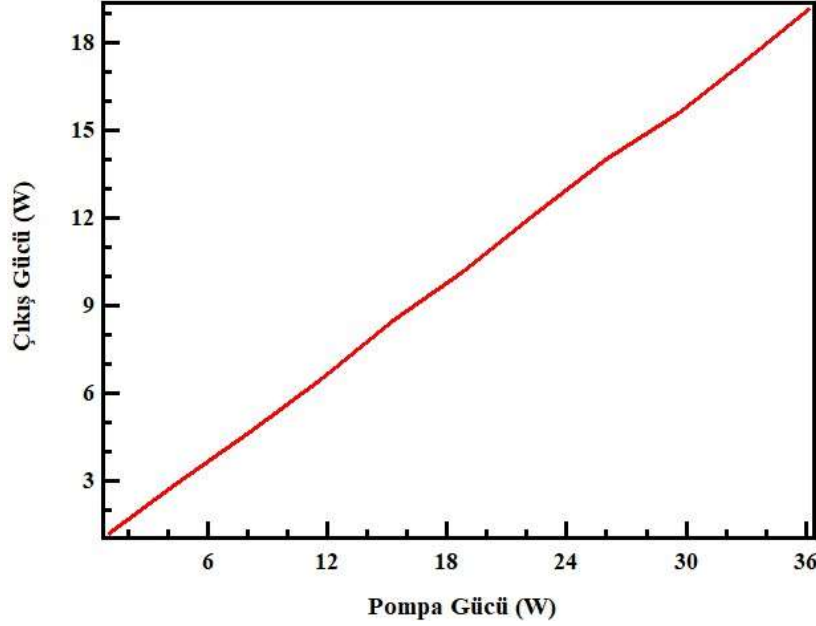


**Şekil 4.63.** Yükselteç Çıkışında 20 W Güçte Elde Edilen Optik Tayf (Logaritmik)



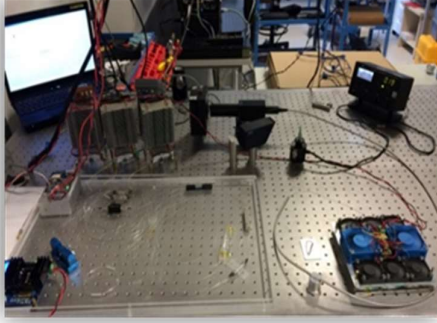
**Şekil 4.64.** Yükselteç Çıkışında 20 W Güçte Elde Edilen Optik Tayf (Çizgisel)

Optik tayfların yarı doruk genişlik değerleri 1.35 nm'ye karşılık gelmektedir. Yükselteç çıkışındaki ortalama optik gücün, pompa gücüne (yükselteç içerisinde bulunan 2 adet 18 W diyotun toplam gücüne) göre oranını gösteren grafik Şekil 4.65'de verilmektedir.



**Şekil 4.65.** Yükselteç Çıkış Gücünün Pompa Gücüne Göre Grafiği

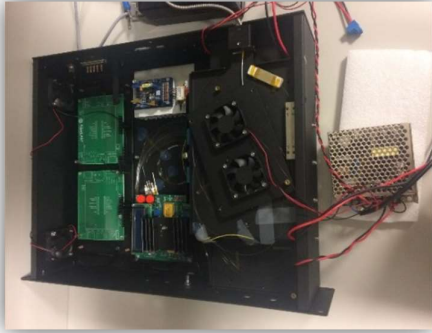
Fiber lazer içerisindeki bütün elektronik cihazlara güç dağıtımı, projenin son dönemi içerisinde yapılmaya karar verilen ve FiberLAST bünyesinde tasarlanıp gerçekleştirilen bir elektronik kart yardımıyla yapılmıştır. Söz konusu bu DC/DC çevirici elektronik kart ile, sistem için tek bir güç kaynağı yeterli olmuş ve daha önceden proje raporunda da belirtilen ve içeriğinde beş adet güç kaynağı bulunan güç kaynağı kutusunun kullanımından vazgeçilmiştir. Elektronik kartın sorumlu olduğu isterler ve sistemin kullanılması ile ilgili bilgisayar arayüzü uygulaması 3.3. iş paketinde anlatılacaktır. Söz konusu fiber lazerin gelişimi aşağıdaki şekillerde adım adım görülmektedir.



**Şekil 4.66.** Fiber lazer deney düzeneği



**Şekil 4.67.** Fiber lazerin yerleştirileceği kutu



**Şekil 4.68.** Fiber lazerin kutulanma sürecindeki hali



**Şekil 4.69.** Fiber lazerin tamamen kutulanmış hali

Proje önerisi başvuru formunda, geliştirilecek olan fiber lazerin atım modülasyonu ile ilgili olarak atım süresi ve atımların kümelenme süresi sehven yanlış yazılmıştır. Doğru olan parametre, kümelenme süresinin nanosaniye mertebelerinde, atım süresinin ise pikosaniye mertebelerinde olması şeklindedir. Proje başvurusunda yazıldığı şekli ile, atım süresinden daha kısa bir süre aralığına sahip küme uzunluğu üretmek teorik olarak imkansızdır. Bununla birlikte kristalizasyon işlemleri yapan gruptan gelen akademik geri dönüşlerden ötürü bir revizyon gerekmiş ve dolayısıyla atım süresi 15 ns uzunluklarına çıkartılmış, kümelenme işleminden ise vazgeçilmiştir. Başvuru formunda kümeler için belirtilen frekans değeri, kristalizasyon işlemlerini de yapan grubun da uygun bulmasıyla, atımlar için de uygun görülmüş ve atımların frekansı 100 kHz olarak ayarlanmıştır.

Fiber lazerin son komponenti olan PM kolimatörün önüne tutucusu katlanabilir olan bir ayna konulmuş ve bu ayna katlanmadığı durumlarda, gelen 1064 nm lazer demetini periskopa gönderecek bir şekilde hizalanmıştır. Söz konusu bu lazer demetinin çizgisel olarak odaklanma

işlemi, 3.3. iş paketinde bulunan örnek işleme düzeneğindeki optik devrede bir silindirik mercek yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak bu iş paketinde, ön yükselteç, ara yükselteç ve yükselteçten oluşan bir fiber lazer gerçekleştirilmiş ve bu fiber lazer çıkışındaki 1064 nm lazer demeti, kullanıcı isteğine bağlı olarak örnek işleme düzeneğine ya da serbest uzay optik kısmına gönderilebilmektedir. Fiber lazerin çıkışından elde edilen lazer demetlerinin özellikleri aşağıdaki Tablo 4.3'de belirtilmiştir.

**Tablo 4.3.** Fiber lazerin çıkışından elde edilen lazer parametreleri

Operasyon Tarzı	Atımlı
Dalgaboyu	1064 nm
Ortalama Güç	20 W
Tepe Gücü	13,3 kW
Tekrar Frekansı	100 KHz
Atım Uzunluğu	15 ns
Atım Enerjisi	200 $\mu$ J
Güç Stabilizasyonu	%0,5
Kutuplanma	Çizgisel
Işın Kalitesi	$\leq 1,2$
Lazer Çıkışı	Lazer Korumalı Kolimatör

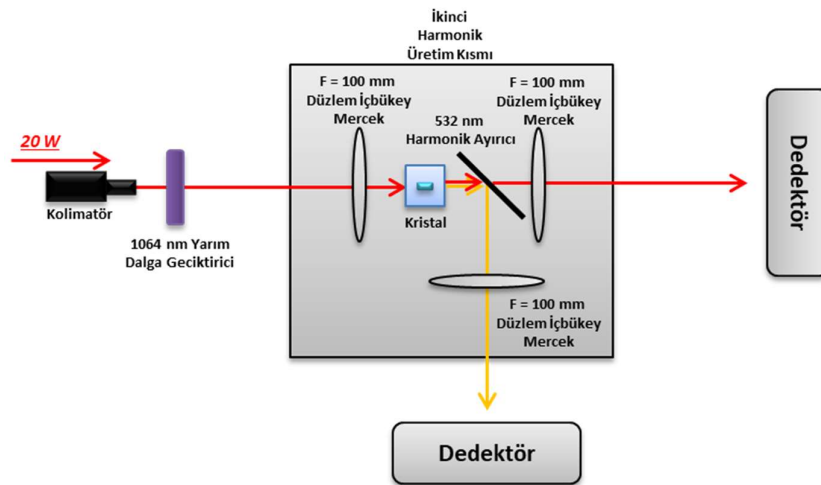
### **İş Paketi 3.2.**

Projenin bu paketinde, tamamı serbest uzay optiğinden oluşan harmonik üretim optik kısmı kurulmuştur.

Harmonik kısmının başlangıç noktası PM kolimatördür. PM kolimatörden çıkan 1064 nm dalga boyundaki lazer, kızılötesi tayflarında çalışan, tutucusu katlanabilir olan bir dielektrik aynaya iletilir. Bu ayna katlanmadığı durumda, lazer demeti, doğrudan periskopa yansıtılmaktadır. Aynanın katlandığı durumda, 1064 nm lazer demeti 1064 nm merkez dalgaboyunda çalışmaya uygun bir yarım dalga geciktiriciden (Half Wave Plate) geçirilir. Ardından odak uzaklığı 100 mm olan düzlem konveks (plane-convex) bir mercekten geçen lazer demeti, ikincil harmonik üretiminin gerçekleşeceği doğrusal olmayan kristalin (nonlinear crystal) içinde odaklanmaktadır. Kullanılan doğrusal olmayan kristal, kritik faz eşleştirme (noncritical phase

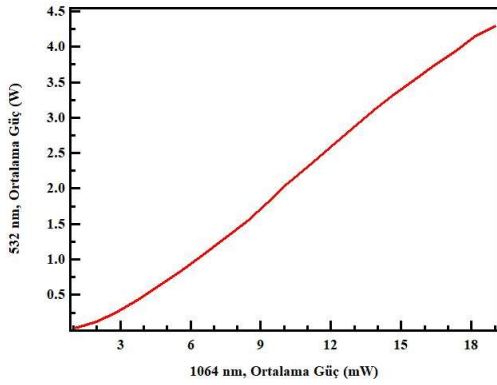


matching) özelliğine sahip olan LBO (Lithium Triborate) kristalidir. Bu özelliğin olması sayesinde, kristale lazerin açılı bir şekilde gönderilmesine gerek yoktur. Kullanılan kristalin boyutları 3x3x20 mm olup, en iyi verimin elde edilmesi için odaklanan 1064 nm lazerin odak noktası, kristalin merkezinde tutulmuştur. Kristal, dış haznesi 50x50 mm'lik bir fırının içindeki kristal boyutlarına uygun bir oyuğa yerleştirilmiştir. Frekans katlanmasının söz konusu olması için doğrusal olmayan kristalin ısıtılması gereklidir. Bu sebepten ötürü fırının sıcaklığı, yapılan deneysel çalışmalar ile optimize edilmiş ve 150.8°C'de ikincil harmonik üretimi için maksimum verim elde edilmiştir. Kristale gönderilen lazer demetinin çizgisel kutuplanma derecesi harmonik verimini arttırmak için gereklidir. Bu sebepten ötürü, yarım dalga geciktirici ile gelen demetin çizgisel kutuplanma derecesi optimize edilerek kristalden maksimum frekans katlanma verimi alınmış ve 532 nm dalga boyunda ikincil harmonik üretimi gerçekleştirilmiştir. İkincil harmonik üretimi için kullanılan kristalin çıkışında 1064 nm ve 532 nm için, uygun olan bir harmonik demet ayırıcı kullanılmıştır. Harmonik demet ayırıcı 1064 nm dalgaboyundaki demeti geçirirken, 532 nm dalgaboyundaki demeti yansıtarak, kristalin çıkışındaki artık (residue) 1064 nm dalgaboyundaki demet ile 532 nm dalgaboyundaki demetin birbirinden ayrılmasını sağlamıştır. Ancak dalgaboylarına göre ayrıştırılan demetlerin ayrıştırılması %100 verimli değildir. Yapılan ölçümlerde, ayrıştırılan demetlerde 532 nm dalgaboyundaki demetin gücünün %1.25'lik oranı kadar bir güce sahip 1064 nm dalgaboyunda lazer demeti bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu da harmonik demet ayırıcının, demetleri ayrıştırabilme verimi ile örtüşmektedir. Kristalden gelip harmonik ayırıcıda ayrıştırılan 532 ile 1064 nm dalgaboyundaki demetlerin önlerinde, demetlerin koşullanabilmesi için 100 mm odak uzaklığına sahip düzlem-konveks iç büküye mercekler konulmuştur. Merceklerin kristalin merkez noktası ile aralarındaki mesafe kabaca 100 mm'dir. Şekil 4.70'de sistemin optik devresi görülmektedir.

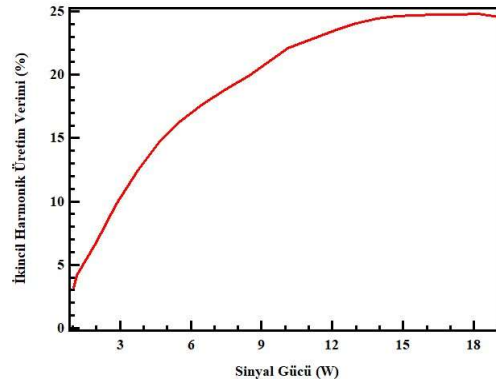


**Şekil 4.70.** İkincil harmonik üretiminin olduğu optik devre

İki demetin de gücü, termal dedektörler ile ölçülmüştür. Gelen sinyalin frekans değerleri ve atım uzunlukları değiştirilmiş ve aynı atım uzunluğunda, 200 kHz frekansta yakalanan tepe gücüyle en yüksek harmonik üretim verimi elde edilmiştir. Tepe gücünün daha da attırılması, atım uzunluğunun kısaltılması veya frekansın azaltılması ile mümkündür. Dolayısıyla daha verimli harmonik üretimi teorik olarak elde edilebilir. Ancak tepe gücünün daha da arttırılması fiber lazerde oluşan doğrusal olmayan etkilerden ötürü mümkün olmamıştır. Şekil 4.71'de 1064 nm sinyal gücüne karşılık üretilen 532 nm lazer demetlerinin güç oranlarının grafiği verilmiştir. Şekil 4.72'de ise sinyal gücüne karşılık ikincil harmonik üretim veriminin bir grafiği görülmektedir. Söz konusu bu grafiklerde, fiber lazerin yükselteç kısmındaki diyotlara sürülen akıma göre 1064 nm lazer demet gücü baz alınmıştır.



**Şekil 4.71.** 1064 nm-532 nm güç oranları grafiği



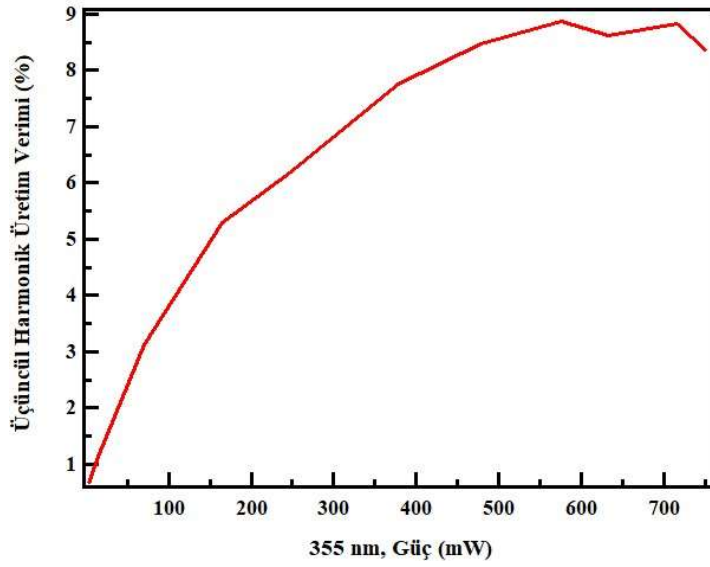
**Şekil 4.72.** 532 nm lazer veriminin, 1064 nm sinyal gücüne göre grafiği

Grafiklerden de anlaşılacağı gibi, ikincil harmonik üretimi ile yaklaşık olarak 4.3 W ortalama güçte ve yaklaşık olarak %24,5 verimde 532 nm lazer demeti üretilmiştir. Bu harmonik üretimi, 200 kHz atım frekansında ve 15 ns atım süresine sahip 1064 nm lazer demeti ile gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu işlemlerin ardından üçüncül harmonik üretim kısmına başlanmıştır. Üçüncül harmonik kısmında, bir başka doğrusal olmayan kristal kullanılmıştır. Burada kullanılan kristalin boyu 3x3x15 mm olarak seçilmiştir. Bir önceki ikincil harmonik için kullanılacak kristalin işlevi, gelen 1064 nm dalgaboyundaki demetin frekansını ikiye katlayarak 532 nm dalgaboyundaki demeti oluşturmaktır. Burada kullanılan üçüncül harmonik kristalinde ise 1064 nm ve 532 nm dalgaboylarında lazer demetlerine ihtiyaç vardır. Bu iki ayrı dalgaboyunun kristalde frekans katlanması işlemine tabi tutulması ile, 355 nm dalgaboyunda lazer demeti elde edilecektir. Bu teknik literatürde, "Sum Frequency Generation" olarak bilinmektedir. Bu teknik ile 1064 nm dalgaboyundaki lazerin frekansı 3 kat artar ve 355 (1064/3) nm dalgaboyunda lazer demeti



Burada kristale yapılan optik hizalama işlemi büyük önem taşımaktadır. En iyi verimle üçüncül harmonik üretimini sağlayabilmek için, kristalde 532 nm ve 1064 nm lazer demetlerinin birbirleriyle eş merkezli olması ve odaklanmış çaplarının birbirlerine yakın genişlikte olması gereklidir. Aynı zamanda, ikincil harmonik kristalinde üretilen 532 nm dalgaboyundaki lazer demetinin, frekans katlanması işleminden sonra çizgisel kutuplanmasındaki kaymanın kontrol edilmesi, üçüncü harmonik üretimi için büyük önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı ikincil harmonik kristalinden çıkan 1064 nm ve 532 nm demetlerin yolları ayrıştırılmış ve 532 nm dalgaboyunda çalışan bir yarım dalga geciktirici, 532 nm lazer demetinin önüne konulmuştur. Hareketli düzeneğin kullanılmasının sebebi ise, ışığın mercek ile odaklanma işleminin tabiatı gereği dalgaboyuna bağlı olmasından ötürü, 532 nm ve 1064 nm dalgaboylarındaki lazer demetlerinin aynı optik merceklerde farklı odak uzaklıklarında odaklanmasındandır. Dolayısıyla hareketli düzeneğin üzerinde bulunan içbükey mercek, hareketli düzeneğin yardımıyla 50  $\mu$ m hassasiyetle hareket ettirilerek, iki lazer demetinin de üçüncül harmonik kristalde aynı noktada odaklanması sağlanmıştır. Kristalin bulunduğu bölgeye gelen lazer demetlerinin eş merkezliliği bir CCD kamera ile kontrol edilmiştir. Kullanılan kamera Thorlabs'ın BC106-VIS model numaralı ürünü olup aktif olarak çalıştığı optik tayf aralığı 350 – 1100 nm arasındadır. Bu kamera ile serbest uzay optik kısmındaki tüm optik hizalamalar kontrol edilmiş ve demetlerin çapları her optik komponentten sonra adım adım gözlenmiştir. Üçüncül harmonik kristalinde lazer demetlerinin aynı çaplarda odaklanabilmeleri için, kristalden önce merceklerle gelen lazer demetlerinin farklı çaplarda olması gereklidir. Bunun nedeni, farklı dalgaboylarında lazer demetlerinin türdeş merceklerde farklı odak genişliklerinde odaklanmalarındandır. Bizim sistemimizde, kristalden önce konumlandırılan merceklerle gelen 1064 nm lazer demetinin çapı 3.88 mm, 532 nm lazer demetinin çapı ise 3 mm olarak ölçülmüştür. Bu çaplarda koşutlanmış olarak merceklerle gelen lazer demetleri, kristal içerisinde yaklaşık olarak 40  $\mu$ m çaplarında odaklanmış ve üçüncül harmonik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen 355 nm lazer demetinin ortalama gücü yaklaşık olarak 750 mW olup, 3.75  $\mu$ J değerinde bir atım enerjisine sahiptir. Üçüncül harmonik kristale gelen 1064 nm lazer demetinin gücü yaklaşık olarak 8.5 W olmaktadır ve bu güç değerine göre elde edilen üçüncül harmonik verimi yaklaşık olarak %8,8'e kadar çıkmıştır. Şekil 4.74'de üçüncül harmonik verimine karşılık gelen 355 nm lazer demetinin güç grafiği görülmektedir.



**Şekil 4.74.** Üçüncül harmonik üretiminin verim grafiği

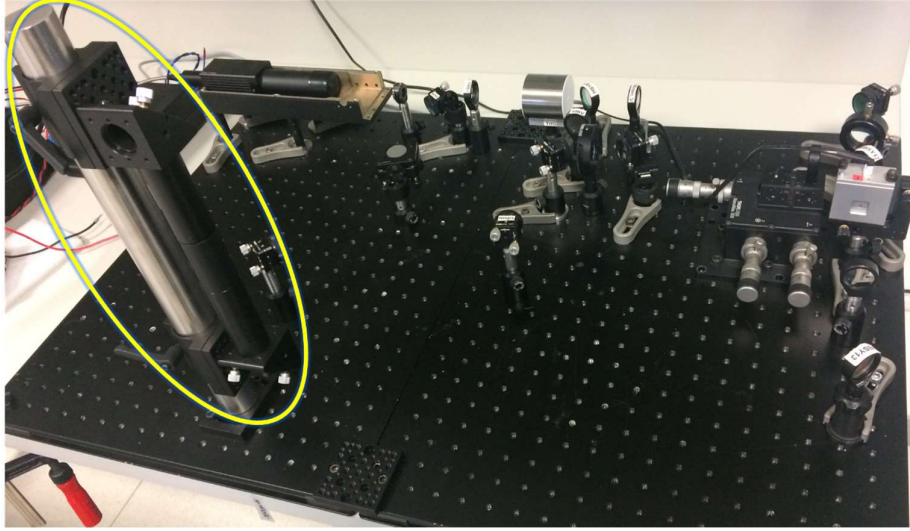
Kristalden çıkan atık (residüe) 1064 nm ve 532 nm lazer demetleri ile birlikte 355 nm lazer demeti, UV dalgaboyunda kullanılan düzlem-konveks iç bükey bir merceğe gönderilerek koşutlanmıştır. Buradan geçen 1064 nm ve 532 nm lazer demetleri bir ışın durdurucuya hizalanmıştır. 355 nm dalgaboyundaki demet ise UV dalgaboylarında çalışan tutucusu katlanabilir bir dielektrik aynaya gönderilmiştir. Buradaki ayna katlı değil iken, 355 nm dalgaboyundaki lazer demeti periskopa yönlendirilmektedir.

Proje önerisi başvuru formunda, başarı ölçütü olarak harmonik üretimi için verilen verim değerleri sehven yanlış yazılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde üretilen 532 nm ve 355 nm lazerler demetlerinin güçlerinin kristalizasyon işlemi için yeterli olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak projenin bu kısmında, tamamen serbest uzay optiğinden oluşan ikincil ve üçüncül harmonik üretimi gerçekleştirilmiş ve bu demetlerin örnek işleme için hangisinin seçileceği, kullanıcı seçimine bırakılmıştır. Böylelikle, lazer demetlerinden yalnızca kullanıcı tarafından seçilen bir tanesi periskopa gönderilebilmektedir. Harmonik üretimi ile elde edilen optik parametreler Tablo 4.4'te verilmiştir. Serbest uzay optiği kısmının tüm hali, Şekil 4.75'de görülmektedir.

**Tablo 4.4.** Harmonik üretimi ile elde edilen optik parametreler

<u>Lazer (Lakris 532 nm)</u>		<u>Lazer (Lakris 355 nm)</u>	
Dalgaboyu	532 nm	Dalgaboyu	355 nm
Ortalama Güç	4,3 W	Ortalama Güç	750 mW
Tepe Gücü	1,43 kW	Tepe Gücü	250 W
Tekrar Frekansı	200 KHz	Tekrar Frekansı	200 KHz

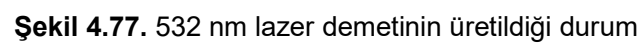
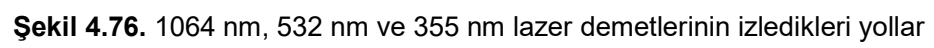
Atım Uzunluğu	15 ns	Atım Uzunluğu	15 ns
Atım Enerjisi	21,5 $\mu$ J	Atım Enerjisi	3,75 $\mu$ J
Kutuplanma	Çizgisel	Kutuplanma	Çizgisel
Lazer Çıkışı	Optik Mercek	Lazer Çıkışı	Optik Mercek



**Şekil 4.75.** Fiber lazer serbest uzay optik kısmı

Şekil 4.76'da harmoniklerin üretimi sırasında 1064 nm, 532 nm ve 355 nm lazer demetlerinin izledikleri yollar oklar ile gösterilmektedir. Kesikli oklar, kesikli okların başladıkları kısımdaki aynaların katlı olduğu durumda, 1064 nm ve 532 nm lazer demetlerinin periskopa hizalanacağı yolu göstermektedir. Şekil 4.77'de 532 nm lazer demetinin üretildiği durumda serbest uzay optik kısmı görülmekte, Şekil 4.78 ve Şekil 4.79'da ise 532 nm ve 355 nm lazer demetlerinin bir kâğıdın üzerindeki hedefe hizalanmış halleri görülmektedir.

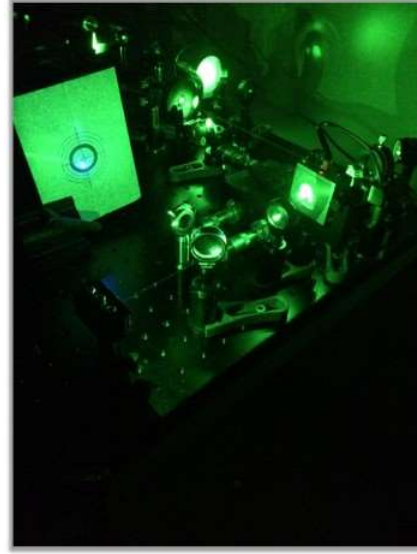






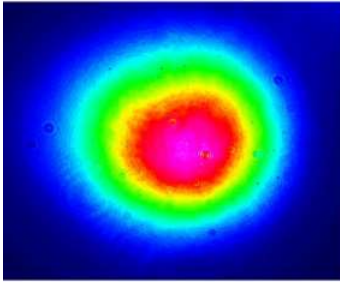


**Şekil 4.78.** 532 nm lazer demeti

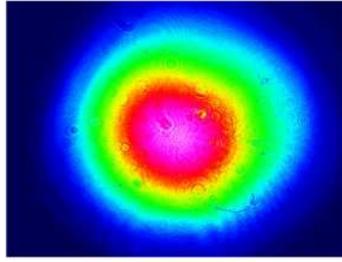


**Şekil 4.79.** 355 nm lazer demeti

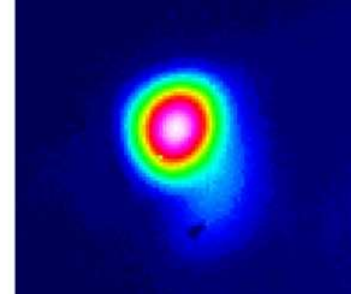
Şekil 4.80'de periskopa gönderilen yaklaşık 3 mm çaplık 532 nm lazer demetinin, Şekil 4.81'de periskopa gönderilen yaklaşık 3.9 mm çaplık 1064 nm lazer demetinin, Şekil 4.82'de de periskopa gönderilen 220  $\mu$ m çaplık 355 nm lazer demetinin CCD kamera (Camera Beam Profiler) ile alınmış görüntüleri (Beam Shape) mevcuttur.



**Şekil 4.80.** 532 nm lazer demetinin şekli



**Şekil 4.81.** 1064 nm lazer demetinin şekli



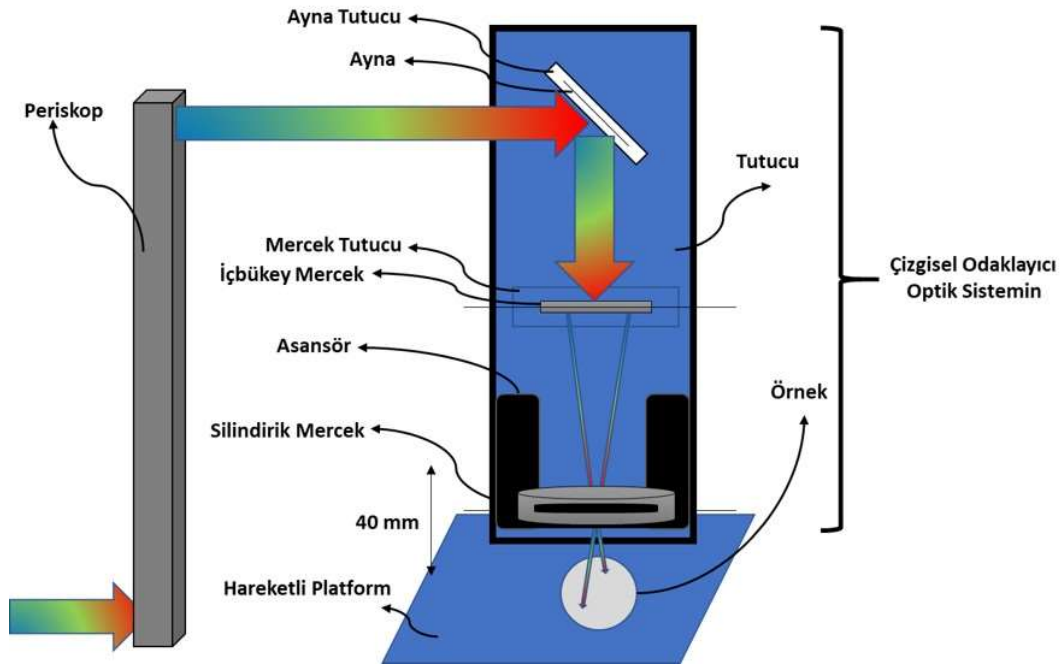
**Şekil 4.82.** 355 nm lazer demetinin şekli

### **İş Paketi 3.3.**

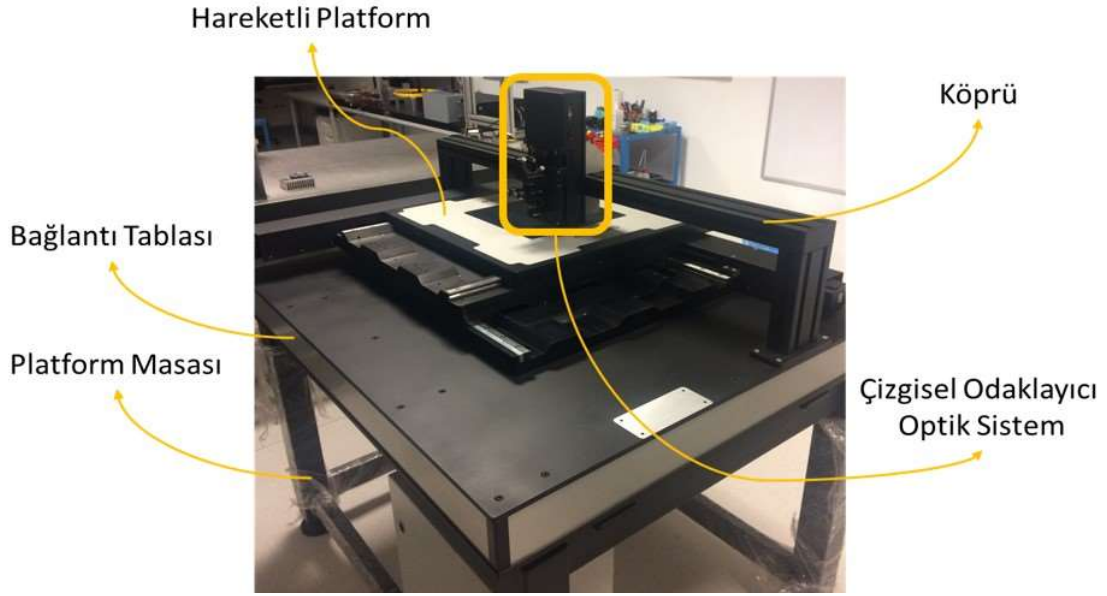
Bu iş paketinde sistemin çalışması için gerekli elektronik gereksinimler, kullanıcı arayüzü ve örnek işleme düzeneği gerçekleştirilmiştir. Örnek işleme düzeneği, hareketli bir platform (stage), bu platformun kullanılması için gerekli teçhizatlar (platform masası ve bağlantı tablası gibi), periskop ve periskoptan gelen lazer demetini hareketli platformun üzerinde çizgisel olarak odaklayacak bir optik bir sistemden oluşmaktadır.

Daha önceden de bahsedildiği gibi harmonik üretimin olduğu serbest uzay optik kısmından gelen bütün demetler, kullanıcı kontrolüyle tek başlarına bir periskopa hizalanabilmektedir. Söz

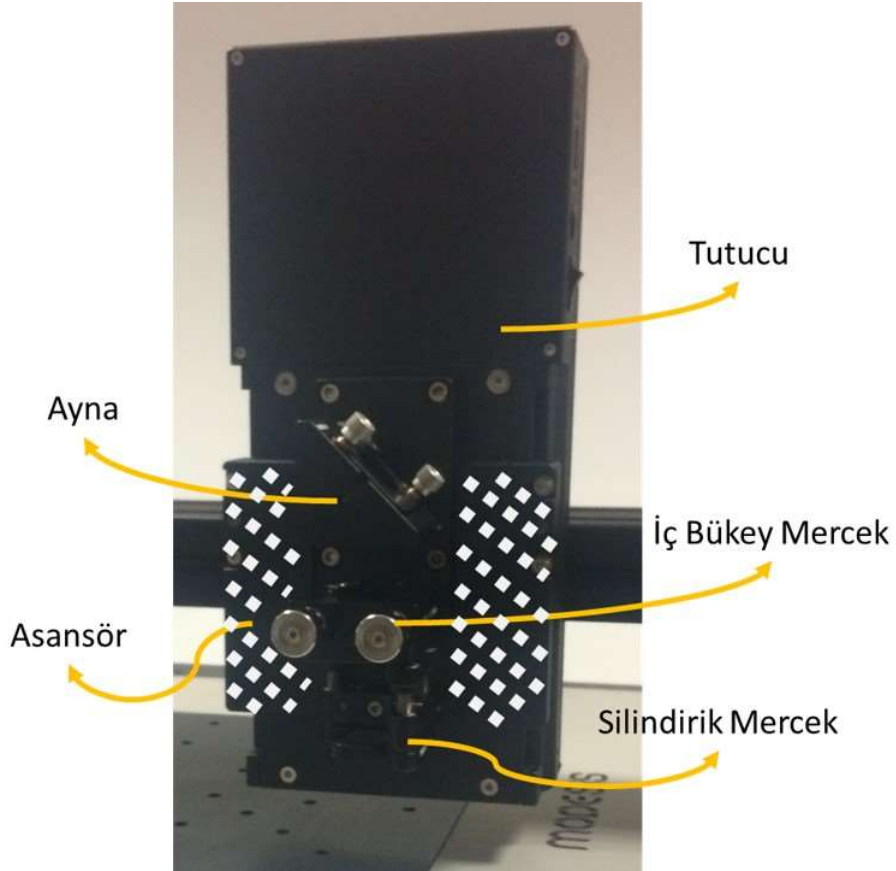
konusu bu periskop, serbest uzay optiğinin bulunduğu optik kısmın yüzeyine dik bir şekilde, lazer demetlerini yükseltmek için kurulmuştur ve Şekil 4.75'deki sarı elipsin içinde bulunan kısımdır. Periskopta 355 nm, 532 nm ve 1064 nm lazer demetlerini yansıtabilen iki ayna bulunmaktadır. Periskoptan gelen lazer demeti, örnek işleme düzeneğinin üzerinde bulunan çizgisel odaklayıcı optik sisteme girmektedir. Bu sistem, hareketli platformun üstünde bulunduğu platform masasına kurulan köprülere sabitlenmiş dikdörtgen bir tutucuya eklenmiştir ve bu tutucu üzerinde Z-eksenindeki odak mesafesini ayarlayabilmek için bir asansör mevcuttur. Şekil 4.83'de periskop, hareketli platform ve çizgisel odaklayıcı optik sistemin bir çizimi, Şekil 4.84'da masasıyla hareketli platform ve çizgisel odaklayıcı optik sistem, Şekil 4.85'de ise daha ayrıntılı bir şekilde çizgisel odaklayıcı optik sistemin gerçek görüntüsü verilmektedir. Beyaz kesitli çizgiler ile belirtilen kısım asansörü belirtmektedir.



**Şekil 4.83.** Periskop, hareketli düzene ve çizgisel odaklayıcı optik sistemin bir çizimi



Şekil 4.84. Masasıyla hareketli platform ve çizgisel odaklayıcı optik sistem

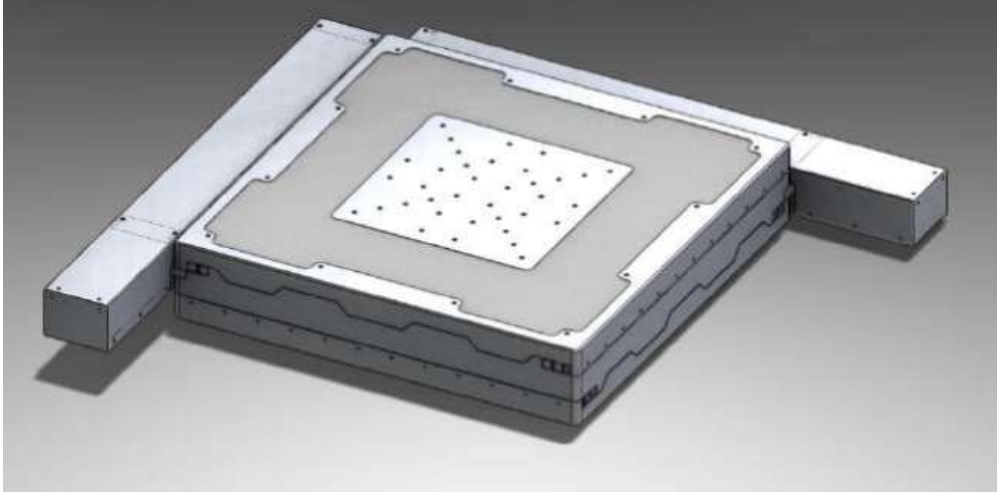


Şekil 4.85. Odaklayıcı optik sistem

Periskoptan gelen lazer demeti aynadan yansıyarak bir düzlem-konveks iç bükey merceğe hizalanır. Mercek ile odaklanmaya başlayan demet silindirik mercek üzerine düşer ve örnek üzerinde çizgisel olarak odaklanır. Silindirik merceğin bağlı olduğu araba 40 mm'lik bir mesafe içerisinde hareket edebilmektedir. Bu uzunluk, kristalizasyon deneylerinin çeşitli odak uzaklığına sahip silindirik mercekler ile gerçekleştirilmesi için hesaplanarak belirlenmiş ve asansör, kullanıcının elle kontrolüne bağlı olarak tasarlanmıştır. Hareketli platform, bir bilgisayar arayüzünden kullanıcı tarafından kontrol edilmektedir. Bu kontrol, hareketli platformun hem +x hem +y ekseninde konumlandırılması, konumlandırma hızı ve platformun merkezlenebilmesini içermektedir. Hareketli platformun çalışma parametreleri Tablo 4.5'te verilmiş, Şekil 4.86'da bir model görseli ile Şekil 4.87'de bir fotoğrafı sunulmuştur.

**Tablo 4.5.** Hareketli platformun çalışma parametreleri

Konumlama Alanı	>300 mm X 300 mm
Konumlama Çözünürlüğü	<1 $\mu\text{m}$
Konumlama Hassasiyeti	<10 $\mu\text{m}$
Eksenel Doğrusallık	< $\pm 2$ $\mu\text{m}$
Düzlemsellik	< $\pm 2$ $\mu\text{m}$
Eksenler Arası Diklik	90° $\pm 40''$ (arcsec)
Maksimum Hız	100 mm/s
Maksimum İvmelenme (+/-) Süresi	0,2 saniye
(Yüksüz): Dikey Yük Taşıma Kapasitesi	>50 kg
Minimum Eksenel Yük	>20 kg
İletişim Arayüzü	RS485



**Şekil 4.86.** Hareketli platformun modeli



**Şekil 4.87.** Hareketli platformun fotoğrafı

Hareketli platformunun XY düzlemsel konumlama ünitesi tamamlandıktan sonra bu üniteyi sağlam bir şekilde ayakta tutacak bir platform masası geliştirilmiştir. Bu masanın tasarımı ile, platformun ivmeli hareketlerinde oluşacak titreşimin elimine edilmesi büyük ölçüde sağlanmıştır. Hareketli platform yaklaşık 95 kg ağırlığında olup azami 100 mm/s hızla hareket edebilmektedir. Hareketli platform ve platform masasını birbirine bağlamak için bir bağlantı tablası kullanılmıştır. Bu tabla, temelde düzlemsel işlem yapılacak olan bu düzenekte, platformun düzlemsellik hatasının birkaç mikrometreden az olması için tasarlanmış ve

platformda eğrilme gibi sorunları ortaya çıkarmayacak mukavemeti gösterecek şekilde üretilmiştir. Platform masası ve bağlantı tablası Şekil 4.84’de görülmektedir.

Bilgisayar üzerinden hem hareketli platformun hem de lazer aç/kapa ve lazere girilmesi gereken parametrelerin kontrolünü sağlayan bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Şekil 4.88’de arayüz görülmektedir. Bu arayüzde, lazer için girilecek parametreler kutusunun içinde, üç yükselteç için de ayrı buton vardır ve bu butonların her biri yükselteçleri açmaktadır. Ayrıca, bu kutuda, yükselteçlere girilecek güç değerleri, frekans ve atım uzunluğu değerleri bulunmaktadır. Frekans girme aralığı 100 kHz - 500 kHz arasında 100 kHz’lik aralıklar ile ayarlanabilecektir. Atım uzunluğu ise 5 ile 500 ns aralığında 5 ns aralıklar ile ayarlanabilecektir. Arayüz yükselteçlerin açılmasını kontrol etmekte olup sırasıyla ön yükselteç, ara yükselteç ve yükselteç şeklinde kontrol edilmektedir. Yükselteç açıkken, diğer yükselteçler kapatılamayacak, ara yükselteç açıkken ön yükselteç kapatılamayacak ve ön yükselteç açıkken yükselteç direkt olarak açılmayacaktır. Aynı şekilde hareketli platform için girilecek parametrelerin olduğu kutuda ise hareketli platform için girilmesi gereken hız ve konum parametreleri mevcuttur. Merkezle butonu ise tüm platformu ilk kurulumda belirlenen (0,0) konuma getirecektir. Alt kısımlardaki güncel parametreler kutuları ise hem platform hem lazer için ayarlanmış son durumdaki parametreleri göstermektedir. Ön yükselteç açık değilse, hareketli platform ile ilgili bütün parametreler diğer yükselteçler açılmaksızın kontrol edilebilir. Böylece lazer ile işlem yapmadan önce hareketli platform konumlandırılabilir. Ön yükselteç butonu açıldıktan sonra, yan tarafındaki açık/kapalı butonu aktif hale getirilirse, hareketli platformun hareket ettirildiği her durumda sırasıyla ara yükselteç ve yükselteç açılacaktır. Böylece platform hareket ederken lazerde işlem yapılabilir. Ayrıca arayüzün en alt kısmında bulunan “Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar ve Girilecek Parametreler” kutusu, kullanıcıyı bilgilendiren bir metin kutusudur.



#### Lazer İçin Girilecek Parametreler

Ön Yükselteç ☐ Açık/Kapalı

Ara Yükselteç Güç Ayarı:

Yükselteç Güç Ayarı:

Frekans (kHz):

Atım Süresi (ns):

#### Lazer İçin Güncel Parametreler

Güç (W):

Atım Süresi (ns):

Frekans (kHz):

**Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar ve Girilecek Parametreler**

Yükselteçlerin açılma sırası: Ön Yükselteç, Ara Yükselteç, Yükselteç

Yükselteçlerin kapatılma sırası: Yükselteç, Ara Yükselteç, Ön Yükselteç

Yükselteç açık iken:  
Ara yükselteç ve ön yükselteç açıp kapatılamaz

#### Hareketli Platform İçin Girilecek Parametreler

Hareket Et (X) Mesafe (X eksen):

Hareket Et (Y) Mesafe (Y eksen):

Hız (X eksen):

Hız (Y eksen):

Merkezle

#### Hareketli Platform İçin Güncel Parametreler

Son Konum (X eksen):

Son Konum (Y eksen):

Son Hız (X eksen):

Son Hız (Y eksen):

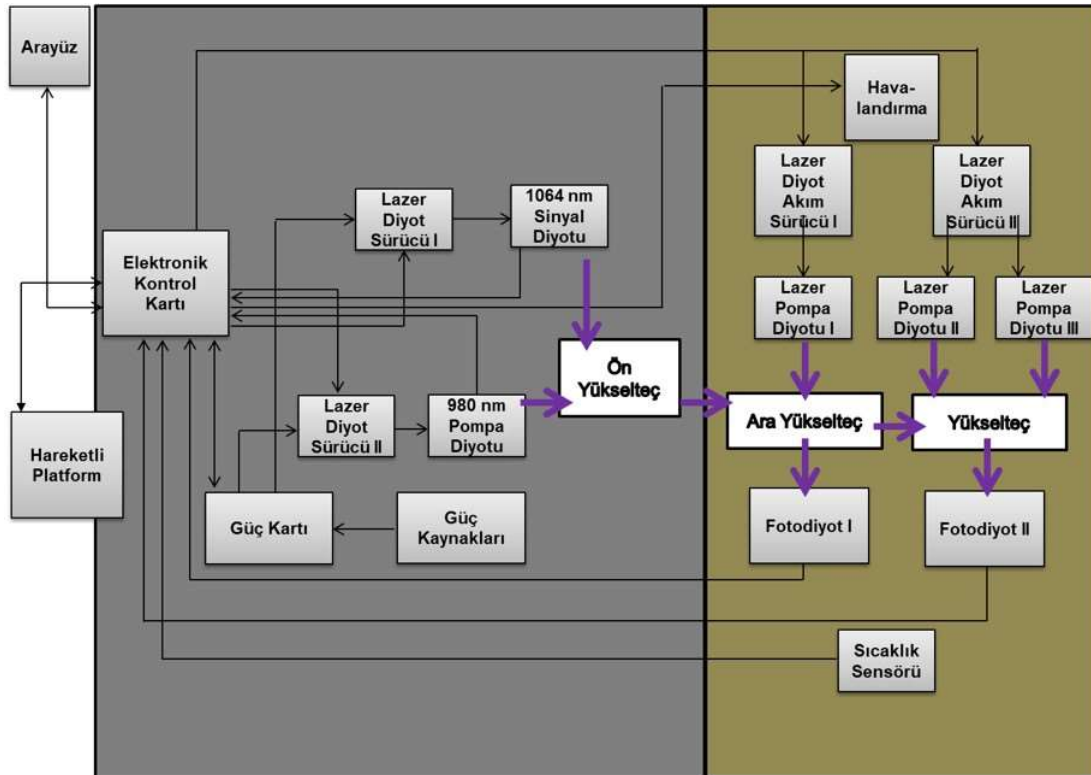
**Şekil 4.88.** Kullanıcı arayüzü

Ön yükselteç, ara yükselteç ve yükselteç kesimlerinin elektronik kesimlerinin birbirleriyle senkronize çalışması ve kullanıcı arayüzüne girilen değerler ile diyotlara sürülecek akımların belirlenmesi dışında, diyotlar ile ilgili olası bir arıza sonucunda sistemin kendini güvenli bir çalışma sürecine çekebilmesi ve diyotların sıcaklık kontrolünün sağlanması için aşağıdaki adımları izleyen bir elektronik ister sırası tasarlanmıştır. Tasarı adım adım olarak aşağıda anlatılmış olup, şeması Şekil 4.89'da belirtilmiştir.

- Güç kaynakları açılır.
- Güç kartı, elektronik kontrol kartı ve lazer diyot sürücülerinin açılması için gerekli gücü bu kartlara iletir.
- Elektronik kontrol kartından gelen bilgi ile, 2nci lazer diyot sürücü 1064 nm sinyal diyotunu modüle etmeye başlar.
- 1064 nm sinyal diyotu, elektronik kontrol kartı ile kontrol edildikten sonra, elektronik kontrol kartından gelen bilgi ile, 2nci lazer diyot sürücü 980 nm pompa diyotunu sürmeye başlar.



- Elektronik kontrol kartından gelen bilgi ile havalandırma çalıştırılır.
- Elektronik kontrol kartından gelen sinyalle 1nci lazer diyot akım sürücü aktif hale getirilir ve 1nci lazer pompa diyotuna belirlenen akımı sürecektir şekilde çalıştırılır.
- 1nci fotodiyottan gelen bilgi kontrol edildikten sonra (1nci lazer pompa diyotu aktif ise) elektronik kontrol kartından gönderilen sinyalle 2nci lazer diyot akım sürücü aktif hale getirilir ve 2nci ile 3ncü lazer pompa diyotlarına belirlenen akımı sürecektir şekilde çalıştırılır.
- 1nci ve 2nci fotodiyotlardan gelen sinyaller elektronik kontrol kartı tarafından kontrol edilir.
- Eğer 1nci fotodiyottan gelen değerlerde bir terslik olursa, sırasıyla 3ncü, 2nci ve 1nci lazer pompa diyotlarının kapatılması için gerekli bilgiyi taşıyan sinyal, elektronik kontrol kartından lazer diyot akım sürücülerine gönderilir.
- Eğer ki 2nci fotodiyottan gelen değerlerde bir terslik olursa 2nci lazer diyot akım sürücü ile 3ncü ve 2nci lazer pompa diyotları kapatılır.
- Sıcaklık sensöründen ölçülen sıcaklık bilgisi, elektronik kontrol kartı ile kontrol edilir.
- Gelen sıcaklık bilgisi beklenen değerlerin dışında ise, havalandırmanın çalışma aralıkları değiştirilir.



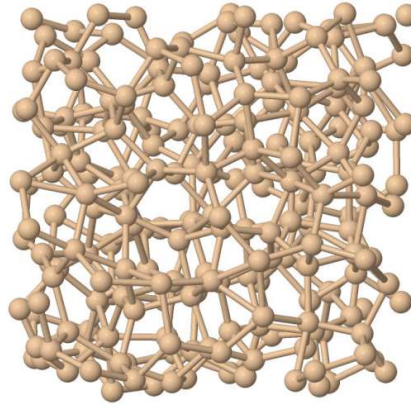
**Şekil 4.89.** Elektronik isterlerin şeması

Sonuç olarak projenin bu kısmında, gelen lazer demetlerini örnek üzerine çizgisel olarak odaklayabilen bir optik düzenek, hareketli bir platform, fiber lazerin kontrollü bir şekilde açılıp kapanması ile olası güvenlik sorunlarına müdahale edilmesi için tasarlanan bir elektronik kontrol sistemi, fiber lazer ile hareketli platformun kullanıcı kontrolünü sağlayan bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiş ve birbirleriyle senkron bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir örnek işleme düzeneği gerçekleştirilmiştir.

#### 4.5. Kurumsal Modelleme ve Hesaplamalar

Projemizin sayısal benzetimli kısmında kristal silisyum (c-Si) ve amorf silisyum (a-Si) arasındaki arayüzün özelliklerinin incelenebilmesi için ön çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarımızda açık kaynaklı bir moleküler dinamik (MD) kod süiti olan LAMMPS (Large Atomic Molecular Massively Parallel Simulation) kullanılmıştır. A-Si teorik olarak doğru istatistikle eldesi son derece zor bir sistemdir. Bunun nedenlerinden en önemlisi, sayısal benzetimlerin periodik kenar koşulları ile yapılma zorunluluğudur. Ancak literatürde doğru istatistiksel mekaniksel özellikleri sağlayan protokoller bulunabilmektedir. Projenin bu kısmında doğru amorf silisyum eldesi için protokol geliştirilmesine gidilmiştir.

Şekil 4.90'da, 216 atomluk bir a-Si hücresi görülmektedir.



**Şekil 4.90.** 216 atomlu a-Si hücresi

Bu sistemin eldesinde kullanılan protokolün basamakları şöyledir:

- 1) 216 atomluk bir kristal Si hücresi alınmıştır.
- 2) Öncelikle basit bir statik minimizasyon algoritması kullanılarak, potansiyel enerji yüzeyindeki en yakın minimuma yakınsaması sağlanmıştır.
- 3) Daha sonra, atomlara 5000K' sıcaklığa denk gelen ve Boltzmann dağılımına uyan bir ilk hız dağılımı verilmiştir.

4) 0.0005 pikosaniyelik bir zaman aralığı kullanılarak öncelikle NVE grubunda (sabit sayı, hacim, enerji ensemble) 5000 adımlık bir termalizasyon sürecinden geçirilen sistem, artık gerçek simülasyona hazır hale gelmiştir.

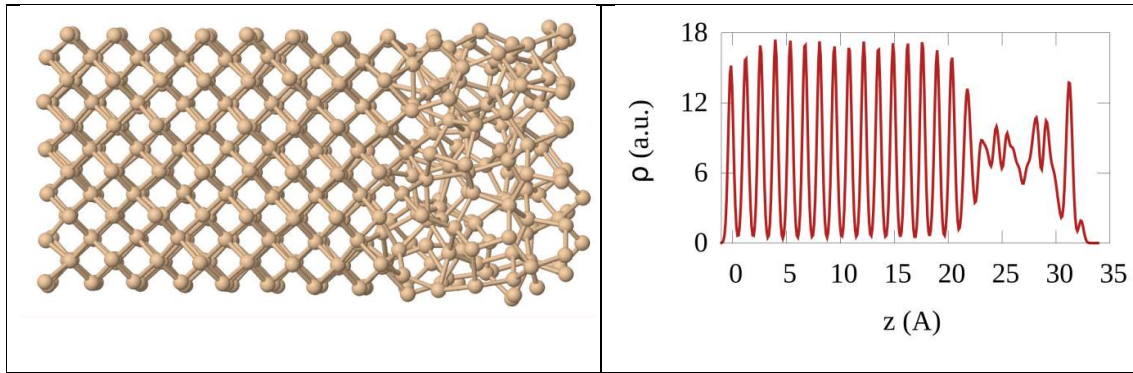
5) c-Si'un amorfize olabilmesi için öncelikle erime sıcaklığının üzerine çıkması gereklidir. Bunun için bu bölümde 100000 adımlık bir NVT grubu (sabit sayı, hacim, sıcaklık ensemble) ile erime sağlanmıştır.

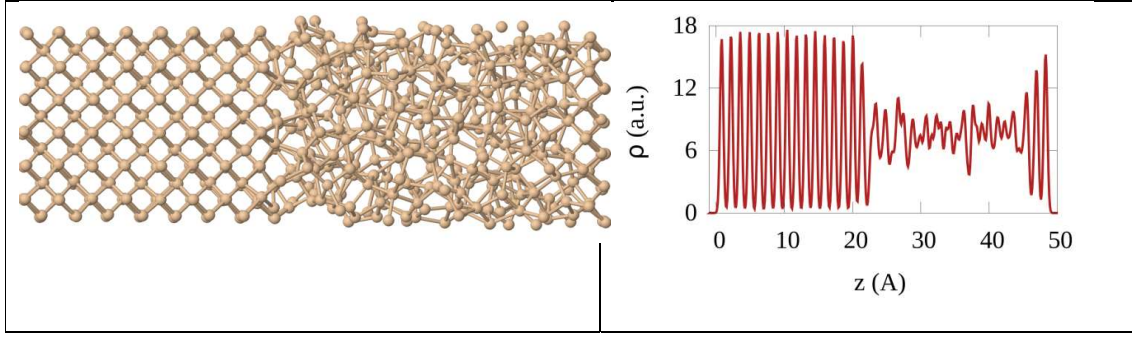
6) Daha sonra *annealing*, yani yavaş yavaş soğutma süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte 200000 adım süresince, sıcaklık sürekli olarak 5000 K'den 300 K'e indirilmiştir.

7) Son olarak da, sistem 300 K'de 20000 adımlık bir NVT grubu entegrasyonuna tabi tutulmuştur.

MD hesaplarında, empirik potansiyel olarak Stillinger-Weber potansiyeli kullanılmıştır. Bu protokolün sonunda elde edilen a-Si'nun açısız çift dağılımı (radial pair distribution) literatürle uyumlu bulunmuştur.

Çalışmalarımızın sonraki bölümünde, a-Si ve c-Si arasındaki arayüzü çalışmak amacıyla sırasıyla 432 ve 648 atomlu iki sistemde yukarıdaki protokol uygulanmıştır. Ancak protokol sırasında z yönünde uzanan simülasyon hücresindeki atomlardan bir kısmı uzayda sabitlenmiştir. Bu kısım, c-Si'u temsil etmektedir. Geri kalan kısım simülasyon sırasında serbest bırakılmış ve sonuç olarak amorfize olmuştur. Bu sistemler için yukarıdaki protokolün son adımında tüm atomlar serbest bırakılmış ve 300 K'de son bir kez termalizasyon sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen sistemler ve z yönündeki atom yoğunluk profilleri Şekil 4.91'de görülebilir.



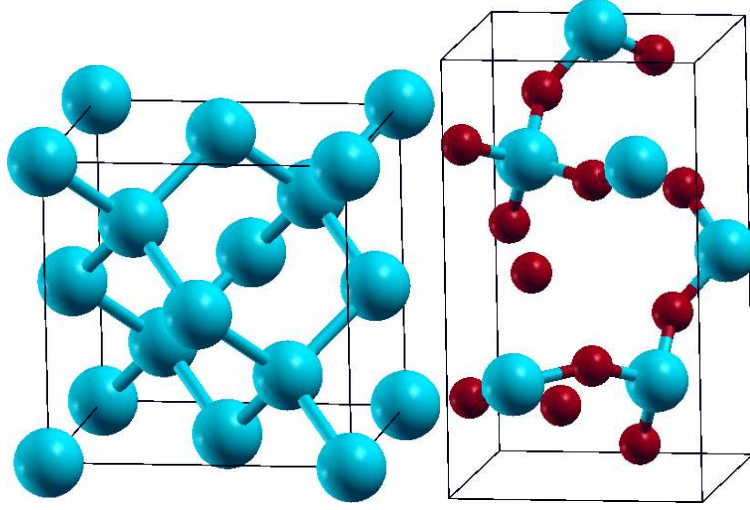


**Şekil 4.91.** 432 (üst paneller) ve 648 (alt paneller) atomlu a-Si/k-Si arayüzlerinin MD sonraki yapıları (sol paneller) ve z-ekseni (hücresin uzun kenarı) yönündeki atom yoğunlukları

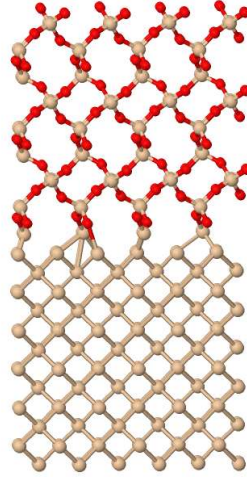
Yoğunluklarda kristal fazdan, amorf faza geçiş, düzenli periyodik davranıştan, kaotik davranışa geçiş olarak kendini göstermektedir.

Deneylerimizle paralellik sağlaması açısından, kristal  $\text{SiO}_2$  (k- $\text{SiO}_2$ ) ve yine kristal Si (k-Si) arayüzleri incelenmiştir. Deneylerimize daha yakın çalışmalar yapabilmek için, önceki dönemde yapılan kristal ve amorf Si hesaplarına ara verilmiştir. Çalışmalarımızda, her zaman olduğu gibi, açık kaynaklı bir moleküler dinamik (MD) kod süiti olan LAMMPS (Large Atomic Molecular Massively Parallel Simulation) kullanılmıştır. Si-Si, Si-O ve O-O arasındaki etkileşim Tersoff potansiyeli ile modellenmiştir. NVT hesapları sırasında Nose-Hoover termostatu kullanılmıştır.

$\text{SiO}_2$ 'in kristal yapısını temsil etmek üzere, kuvarz, Si için ise elmas yapısı kullanılmıştır. Kuvarz ve Si elmas yapıları Şekil 4.5.1'de görülebilir. Örgü sabitleri birbirinden farklı malzemeler arasında oluşturulan her arayüzde olduğu gibi k- $\text{SiO}_2$ /k-Si arayüzünde de örgü sabiti örtüşmezliği söz konusudur.  $\text{SiO}_2$ 'nin Şekil 9'da görülen konvansiyonel birim hücresi 5.05 Å x 8.75 Å x 5.54 Å büyüklüğündeyken, elmas Si için bu değerler 5.43 Å x 5.43 Å x 5.43 Å'dur. Dolayısıyla x doğrultusunda 2  $\text{SiO}_2$ /2 Si ve y yönünde ise 2  $\text{SiO}_2$ /3 Si hücresi çoğaltılarak iki materyalin neredeyse örtüşen periodik yapıları olması sağlanmıştır. Ancak sistemler arasında yine de yaklaşık %8 civarında bir uyumsuzluk kalmaktadır. Bu uyumsuzluğu gidermek için  $\text{SiO}_2$  x yönünde yaklaşık %4 kadar genişletilmiş, y yönünde ise %4 kadar sıkıştırılmıştır. Si kristaline ise yine aynı yönlerde tam tersi elastik gerilim uygulanmıştır. Bu şekilde minimal bir yanıl adaptasyon ile arayüz oluşturulmuştur (Şekil 4.5.4). Eksen yönünde (her iki kristal için de 001 yönüne denk gelmektedir), periodik yapıdan dolayı iki çeşit arayüz söz konusudur. İlkinde k-Si yapısı,  $\text{SiO}_2$ 'nin oksijen zengini yüzeyi ile, diğerinde ise Si zengini yüzeyiyle temas halindedir. Modelimiz iki çeşit arayüzü de incelemesi açısından elverişlidir.



**Şekil 4.92.** Si (sol) ve SiO<sub>2</sub> (sağ) kristal yapıları



**Şekil 4.93.** Si/SiO<sub>2</sub> arayüzü. Kırmızı küreler O, sarı küreler ise Si atomlarını temsil etmektedir.

**Model oluşturulduktan sonra, aşağıdaki protokolle termal dengeye getirilmiştir:**

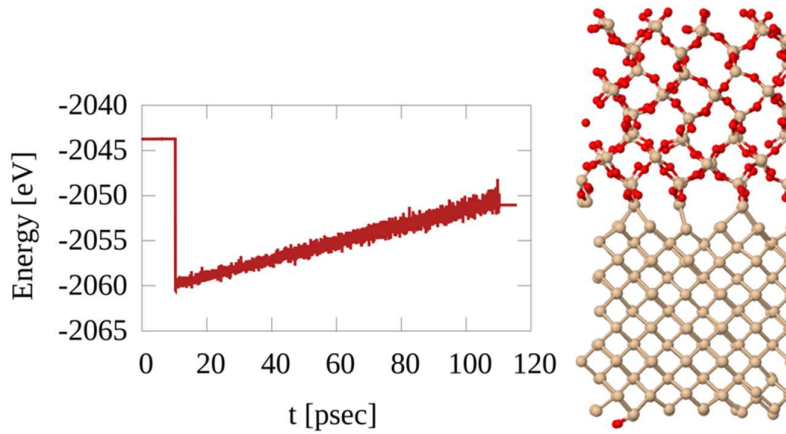
- 1) Toplamda 360 atoma sahip olan k-Si/k-SiO<sub>2</sub> hücresi alınmıştır.
- 2) Öncelikle basit bir statik minimizasyon algoritması kullanılarak, potansiyel enerji yüzeyindeki en yakın minimuma yakınsaması sağlanmıştır.
- 3) 0.0005 picosaniyelik bir zaman aralığı kullanılarak öncelikle NVE grubunda (ensemble) 5000 adımlık bir termalizasyon sürecinden geçirilen sistem, artık gerçek simülasyona hazır hale gelmiştir.

4) NVE simülasyonunun sonunda sistemin enerjisinin yaklaşık 100 K civarında sabitlendiği görülmüştür. Bunu takip eden 200000 adımlık NVT simülasyonunda sıcaklık sürekli olarak 100 K'den 200 K'e çıkarılmıştır.

5) Daha sonra termalizasyonun doğru gelişip gelişmediğini test edebilmek ve daha da önemlisi fiziksel olarak daha anlamlı bir termodinamiği temsil ettiğinden dolayı kısa (10000 adım) bir NVE simülasyonu daha yapılmıştır.

6) Sonuçlar analiz edilmiştir.

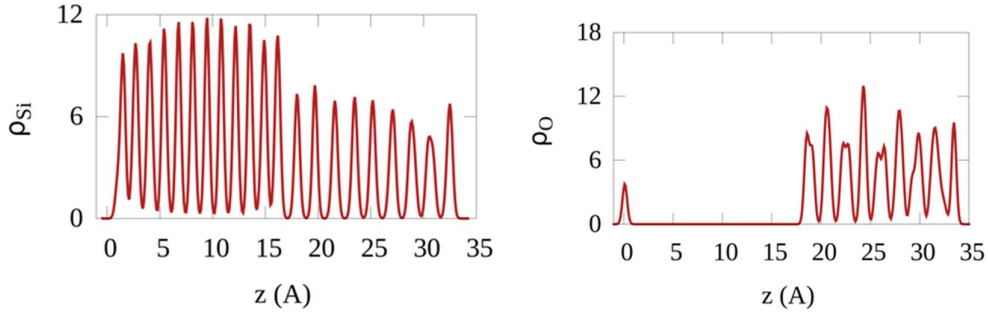
Şekil 4.94'te yukarıdaki protokol süresince, zamana göre toplam enerji profili görülmektedir. Profil beklendiği gibidir. Sıcaklık arttıkça sıcaklığın salınımları da artmaktadır ki bu kanonik grup (canonical ensemble) fiziğinde normal bir sonuçtur. En son NVE basamağında sıcaklığın oldukça sabit olması termodinamiksel olarak stabil bir sistem elde ettiğimiz göstergesidir. Bu işlem sonucunda elde edilen sistem de Şekil 4.95'te görülebilir.



**Şekil 4.94.** Simülasyon boyunca zamana göre enerji grafiği (sol), simülasyon sonucundaki yüzeyin yapısı(sağ)

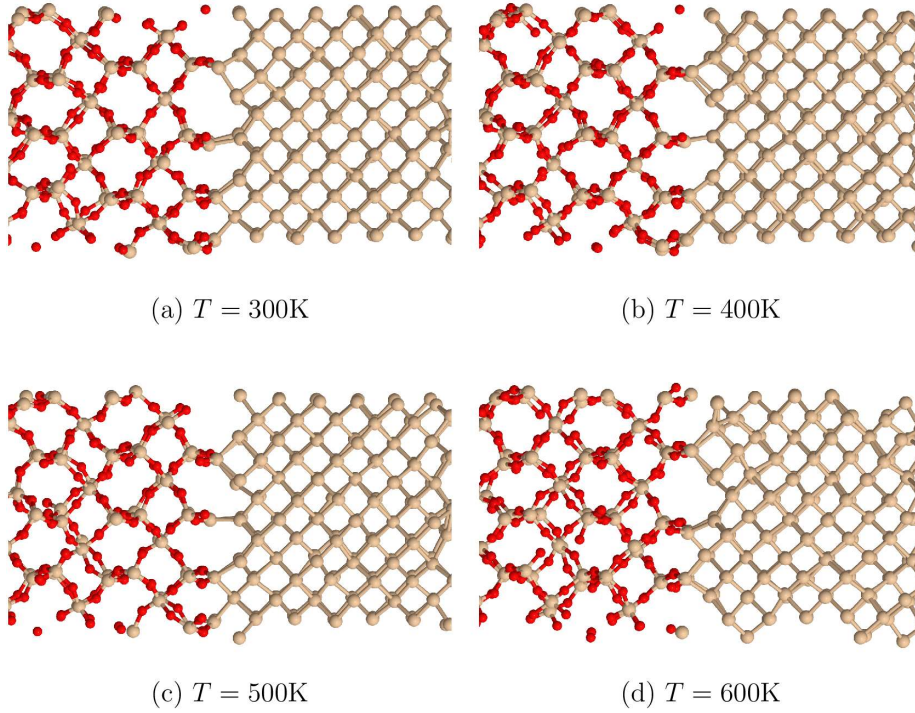
Arayüzlerin özelliklerinin anlaşılabilmesi için, simülasyon sonrası yapıda, z yönü boyunca Si ve O yoğunlukları hesaplanmış ve Şekil 4.95'te verilmiştir. Bu sonuçlarda da görüldüğü gibi arayüzün Si kısmındaki kristal yapı neredeyse bozulmadan kalmıştır. SiO<sub>2</sub> kısmında ise, yapının daha açık olmasında kaynaklı olarak O örgüsünde daha fazla olmak üzere bozulmalar söz konusudur.





**Şekil 4.95.** Eksen boyunca Si (sol) ve O (sağ) atomlarının yoğunlukları

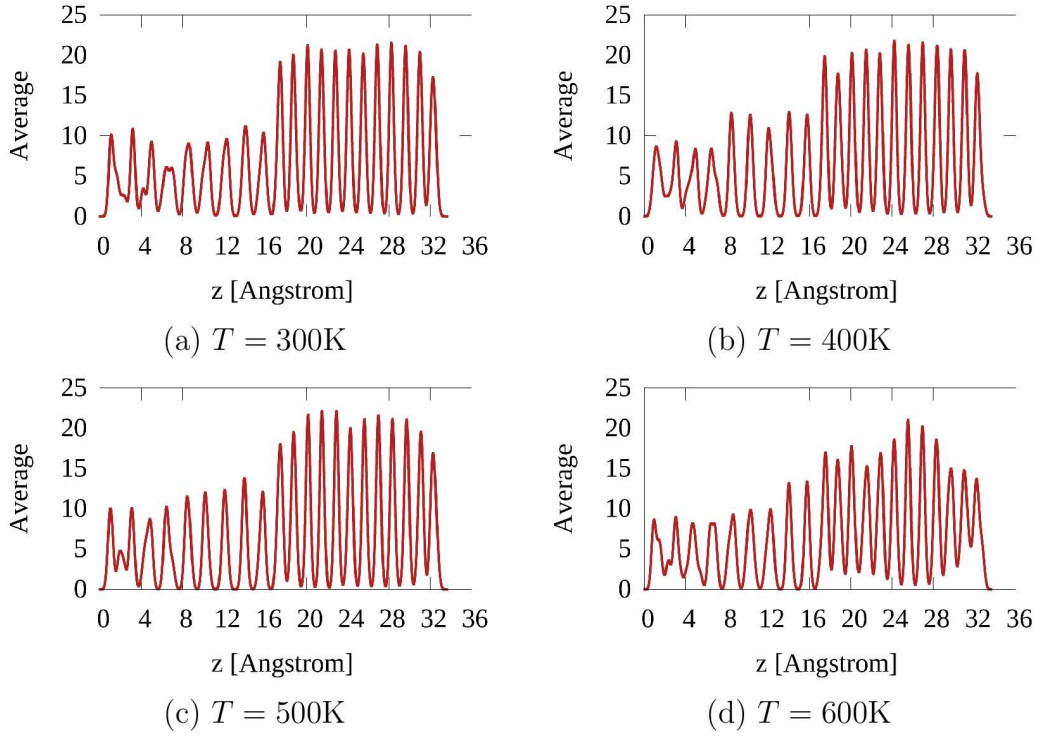
Projemizin hesaplamalı bölümünde  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  arayüzü çalışmalarına devam edilmiştir. Bu çalışmalardan örneklerimiz Şekil 4.96 ve Şekil 4.97'de görülebilir. Şekil 4.96'da  $T = 300 \text{ K}$ ,  $T = 400 \text{ K}$ ,  $T = 500 \text{ K}$  ve  $T = 600 \text{ K}$  sıcaklıklarında gerçekleştirilen MD hesaplarından elde edilen atomik koordinatlar yer almaktadır. Şekil 4.97'de ise bu koordinatlardan yola çıkarak hesaplanan, Si atomlarının “düzlemsel averajları” görülmektedir.



**Şekil 4.96.** 300-600 K sıcaklıklarında yapılmış olan MD benzetimlerinden elde edilen atomik koordinatlar

Şekil 4.96'de görsel olarak fark edilen ve Şekil 4.97'de de averaj ile kanıtlanan gözlem,  $T = 600 \text{ K}$ 'ye kadar atomların ciddi bir şekilde yer değiştirmemiş olmaları, ancak  $600 \text{ K}$ 'ye gelindiğinde çok hafif amorfleşme eğiliminin başladığıdır.





**Şekil 4.97.** 300-600 K sıcaklıklarında yapılmış olan MD simülasyonlarından elde edilen atomik koordinatlar kullanılarak elde edilen Si düzlemsel averajları.

Bu grafiklerde salınımlar ne kadar düzgün oluyorsa o kadar düzenli bir atomik diziliş söz konusudur.

## 5. TARTIŞMA/SONUÇ

### 5.1. İş Paketleri Sonuçlarının Analizi ve Başarı Kriterleriyle Karşılaştırmaları

#### ***İş Paketi 1:** İnce Film Amorf Silisyum (a-Si) ve Polikristal Silisyum (poli-Si) Katmanlarının Geliştirilmesi*

Bu iş paketinde PECVD yöntemiyle 1000 nm ( $\pm 10$  nm) ve E-demet buharlaştırma yöntemiyle 650 nm (+5 nm) kalınlığında amorf silisyum filmler cam veya cam üzeri  $\text{SiNx/TiO}_2/\text{AZO}$  kaplama üzerinde hassas bir şekilde büyütülmüştür. Kalınlıklar proje başarı ölçütünde belirtildiği  $\pm 5\%$  hassasiyetinden çok daha hassas,  $\pm 1\%$  mertebesinde kontrol edilebilmiştir. 1064 nm ns atımlı lazer etkileşim teknikleri kullanılarak yüzlerce mikrometre uzunluğunda kristalit tane büyüklüğü elde edilmiştir. >600 nm olarak yani 100 nm kalınlığının çok üzerinde polikristal Si tabakaların üretilmesi gerçekleştirilebilmiştir. Moleküler dinamik hesapları gözlemlere paralel olarak amorf silisyumdan kristal silisyuma geçişi öngörmüştür.

#### ***İş Paketi 2:** Fotovoltaik Hücre Yapılarının Geliştirilmesi*

Bu iş paketinde çalışmalara önce katkılama ile kristalizasyonun aynı anda uygulanabilirliğinin test edilmesiyle başlanmış, intrinsic a-Si filmlere spin-on katkılama malzemesi taşıyıcısı kaplanarak lazerle kristalizasyona geçilmiştir. Ancak sonuç film kalitesinin yeterli olmaması dolayısıyla strateji değiştirilerek p+ ve p tipi a-Si kaplamalar yapılarak kristalizasyon gerçekleştirilmiştir. Kristalizasyon çalışması 15 mm x 15 mm ebatlı makroskopik numunelerde yeterince hızlı gerçekleştirilebilmesi amacıyla çizgi odaklı tarama tasarımı geliştirilmiştir. Raman ve EBSD ölçümleri ile tarama hızı, atım örtüşme oranı, atım enerjisi gibi parametreler en iyi kalitede silisyum filmi üretimi için optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen parametreler kullanılarak tüm numune alanında gerçekleştirilen kristalizasyon sonrası oluşan polikristal silisyum filmin üzeri PECVD ile n tipi amorf silisyum kaplanarak eklem oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan eklemlere Al kontaklar yerleştirilerek aygıt haline getirilmiştir. Elde edilen aygıtlardan silisyum tane yapılarının 1-2 mm kadar makroskopik ölçüde büyük olmalarına rağmen %29 FF ve %0,04 verimlik elde edilebilmiştir. Başlangıç ince filminin kaplanmasından kristalizasyonda atım örtüşme oranına, kontakların oluşturulmasına değin parametre uzayı son derece geniş olan çalışmada sistematik ilerleme en iyi şekilde kristalizasyon işleminde gerçekleştirilebilmiş ancak cihaz kaynaklı sınırlamalar (PECVD kaplamaların H içeriği nedeniyle iyi kristalize olmamaları ve burumda mecbur kalınan e-beam buharlaştırma yönteminde ise her numune için kaplamanın 3 gün toplam süre alması gibi) nedeniyle film optimizasyon işlemleri sınırlı olarak gerçekleştirilebilmiştir. Bu aygıtların üretiminde 1) optimal film kalınlığı çalışmasının sınırlı kalması, 2) cam alttaştan safsızlık difüzyonu, 3) toplam atım enerjisinin çizgi odak uzunluğunu daha artırmaya elverişli olmamasından doğan nispeten uzun tarama süreleri gibi olumsuz etmenler göz önünde bulundurulduğunda dünyada ilk kez projemizde uyguladığımız bu yöntem ile ince film kristal silisyum film eldesi ve bu filminden eklemli aygıt üretilebilmiş olması bile bir başarı olarak değerlendirilmelidir. Üstelik çalışmalarımızı örneğin Almanya Helmholtz Merkezi'nde görünür dalgaboyunda sürekli ışık kaynakları kullanılarak vakum altında ve onlarca mikrometre kalınlığında filmlerin 700C'yi aşan alttaş ısıtma ve RTA ısıtma basamaklarını içeren son derece enerji yoğun ve yüksek masraflı cihazlar kullanarak yaptıkları çalışmalarına özellikle zıt olacak şekilde oda sıcaklığında, atmosfer ortamında ve yalnızca 16 W güç kullanarak gerçekleştirmiş olduğumuz göz önünde bulunduğunda bu filmlerden eklem elde edilebilmesi bile başarı olarak görülmelidir.

***İş Paketi 3: 1064 nm / 532 nm / 355 nm dalga boylarında nanosaniye atımlı çizgisel odaklı lazer sisteminin geliştirilmesi***

Proje önerisi başvuru formunda, başarı ölçütlerinde, üretilecek olan fiber lazerin atım modülasyonu ile ilgili olarak atım süresi ve atımların kümelenme süresi sehven yanlış yazılmış

olup, kümelenme süresinin nanosaniye mertebelerinde, atım süresinin ise pikosaniye mertebelerinde yazılması ile ifade teknik olarak doğru olacaktır. Aksi takdirde atım süresinden kısa bir süre küme uzunluğuna atımı yerleştirmek imkansızdır. Bununla birlikte kristalizasyon işlemleri yapan gruptan gelen akademik geri dönüşlerden ötürü bir revizyon gerekmiş ve dolayısıyla kümelenme işleminden vazgeçilmiş, atım süresi 15 ns uzunluklarına çıkartılmıştır. Aynı şekilde, başarı ölçütü olarak harmonik üretimi için verilen verim değerleri sehven yanlış yazılmıştır. Harmonik üretimlerinde, ikincil harmonik (532 nm) için %8.8 ve üçüncül harmonik (355 nm) içinse %24.5'lik bir verim elde edilmiştir. Söz konusu bu projenin bu kapsamında üretilen harmonik verimlerinin kristalizasyon işlemi için yeterli olduğu, kristalizasyon grubunca uygun bulunmuştur.

Sonuç olarak, 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboylarında lazer demetleri üreten sistem bitirilmiş ve bütün sistem hareketli bir platformu içeren, diğer iş paketlerinde lazer ile ilgili çalışmaları kolaylıkla yürütülmesini sağlayan, çizgisel odaklı bir lazer işleme platformuna dönüştürülmüştür.

#### ***İş Paketi 4: İşlem Karakterizasyonu ve Optimizasyonu***

Bu iş paketi kapsamında tüm çalışmalar ilk iki iş paketinin içersinde geri dönüşlü olarak hızlı ve hassas şekilde gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskopi, SEM görüntüleme, Raman spektroskopisi, EBSD ölçümleri, 4-point probe, solar simülatör gibi çeşitli teknikler ihtiyaç olduğunca kullanılarak kristalizasyon parametrelerinin optimizasyonunda ve aygıt karakterizasyonlarında önemli rol oynamıştır.

#### **5.2. Proje Genel**

Proje boyunca yapılan çalışmalardan atımlı lazerle ince film amorf silisyum kristalizasyonu ve bu filmde güneş gözesi üretimi ile ilgili araştırmamızdan elde ettiğimiz bulgular şu şekildedir:

1) İki alternatif yöntemle (PECVD ve e-beam buharlaştırma) amorf silisyum kaplama gerçekleştirilmiş ve bunlardan hangisinin lazerle kristalizasyona daha uygun olduğu tespit edilmiştir (e-beam buharlaştırma). Bunun nedeninin PECVD prekürsör gazlarından kaynaklanan amorf silisyum filmin içinde yoğun miktar H bulunması ve kristalizasyon sırasında bu H atomlarının buluşarak gaz fazında moleküler  $H_2$ 'ye dönüşmesi sonucu filmlerde baloncuklanmaya ve dolayısıyla pin-hole'lara neden olmasıdır. E-beam filmlerde böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır.

2) Cam alttaşı ile amorf silisyum arasına yerleştirilecek ince filmlerin kristal kalitesinde hem difüzyon bariyeri olarak davranmaları hem de yapıştırıcı görevi görmelerinden dolayı iyileştirme olasılıkları öngörülmüş, bu amaçla  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{SiO}_2$  filmler farklı yöntemlerle ara katman olarak kaplanmıştır. Bunlardan  $\text{TiO}_2$ 'nin diğerlerine görece daha iyi performans göstermiştir. Bu konudaki bulgularımız SCI yayın olan ACS Omega dergisinde 2018 yılında yayınlanmıştır.

3) Nokta odak ile yapılan çalışmalar hem odaktaki ışık şiddeti gradyentinin yüksek olmasından hem de taramaların çok uzun sürmesinden dolayı terk edilerek çizgi odağa geçilmiş, bu sayede tarama süresi aynı büyüklükte yüzeyler için 200-300 kat kısalmıştır.

4) Atım örtüşmelerinin sistematik bir incelemesi gerçekleştirilmiş atım örtüşme oranının artırılmasıyla kristal kalitesinde iyileşme olduğu gözlenmiştir. Gerçekleşen kristalizasyonun literatürde “explosive crystallization” denilen tipte gerçekleştiğine yönelik bulgular elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlarla desteklediğimiz bu bulgularımızı paylaşmak üzere ikinci bir SCI yayın için hazırlığımız tamamlanmış, yayın dergiye gönderme aşamasına gelmiştir.

5) Spin-on katkılama yöntemiyle fosfor ya da boron atomlarının amorf silisyumun kristalizasyonu sırasında lazer yardımıyla difüze ettirilebileceği düşüncesiyle tek basamaklı katkılı kristalizasyon denenmiş ancak büyük ihtimalle taşıyıcı malzemenin amorf silisyumu lazerle işleme sırasında bozması nedeniyle netice alınamamıştır. Bu şekilde elde edilen filmlerin hem mekanik entegriteleri bozuk hem de iletkenlik özellikleri düşük çıkmıştır ve yöntemden vazgeçilmiştir.

6) E-beam ile kaplanmış p+/p tipi iki katmanlı amorf silisyum filmin çizgi odakla taranarak kristalizasyonu ve bunu takiben PECVD ile n tipi amorf silisyum kaplamayla heteroeklem eldesi birkaç cm'lik makroskopik alanda başarılmış ve kontaklar oluşturulmasıyla I-V eğrilerinde rektifikasyon ve solar simülatörle de % 0,1 mertebesinde etkinlik gözlemlenebilmiştir.

7) Plazmonik gümüş nanoparçacıkların bitmiş aygıt yüzeyini donatmaları ile ölçümler tekrar edilmiş ve kısa devre akımında 10 kata kadar artış elde edilebilmiştir.

8) 1064 nm ve ns atımlı lazerden %9 çevirim verimiyle ikinci ve % 25 çevirim verimiyle üçüncü harmonik elde edilebilmektedir.

9) Tüm harmonikler ortak bir optik hatta birleştirilerek galvo ve motorize tarayıcı eşliğinde geniş alanları işlemeye yarayacak çizgi odaklı bir fiber lazer platformu üretilebilmiştir.

Bu önemli araştırma bulgularına ilave olarak ifade edilmelidir ki proje konusu henüz çokça çalışılmamış ancak oldukça zengin bir alandır ve proje sayesinde bir adet doktora tez çalışması gerçekleştirilebilmiş, bilim insanı yetiştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

## Proje Çıktıları

**Tablo 5.1.** Proje çıktıları

Sıra	Çıktı türü	Yazarlar	Başlık	Yayın yeri	Durumu*
1	Tez (Doktora)	Kamil ÇINAR	Nanosecond Pulsed Infrared Laser Induced Crystallization of Amorphous Silicon Films for Potential Photovoltaic Applications	ODTÜ	Yayınlandı
2	Makale	Kamil ÇINAR, Mehmet KARAMAN, Alpan BEK	Improvement of Laser-crystallized Silicon Film Quality via Intermediate Dielectric Layers on Glass Substrate	ACS Omega	Yayınlandı
3	Makale	Volkan TÜRKER, M. Emre YAĞCI, Sarper H. SALMAN, Kamil ÇINAR, S. Koray EKEN, Alpan BEK	A Dual-Wavelength Pulsed Laser Processing Platform for a-Si Thin Film Crystallization	Instruments	Yayınlandı
4	Bildiri	Kamil ÇINAR	Laser Crystallization of Amorphous Silicon Thin Films	GUNAM Workshop 2017	Yayınlandı
5	Poster	Kamil ÇINAR, Baran U. TEKİN, Mehmet KARMAN, Alpan BEK	Quality Enhancement of Laser Crystallized Amorphous Silicon Thin Films	GUNAM Workshop 2017	Yayınlandı
6	Poster	Baran U. TEKİN, Kamil ÇINAR, Mehmet KARAMAN, Alpan BEK	Lazerle Kristallendirilmiş Amorf Silisyum İnce Filmlerin Kristal Kalitelerinin Artırılması	6.YMF İzmir	Yayınlandı
7	Poster	Baran U. TEKİN, Kamil ÇINAR, Alpan BEK	Lazerle Kristallendirilmiş Amorf Silisyum İnce Filmlerin Kristal Kalitelerinin Artırılması	22.YMF Ankara	Yayınlandı
8	Poster	Kamil ÇINAR, Salar H. SEDANİ, Ergi DÖNERÇARK, Nardin AVISHAN, A. Ege AYTAÇ, Alpan BEK	Laser Crystallization of Si Thin Film via Pulsed IR laser for Ultra-Thin Crystalline Solar Cells	PVCON2018	Yayınlandı

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ALPAN BEK
Proje No:	115M061
Proje Başlığı:	Lazer Kristalizasyon Yöntemi İle Yüksek Verimli İnce Film Kristal Si Güneş Gözesi Geliştirilmesi
Proje Türü:	1003 - Öncelikli Alanlar (2. Aşama)
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	HANDE TOFFOLI
Danışmanlar:	RAŞİT TURAN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/12/2015 - 01/12/2018
Onaylanan Bütçe:	1864033.0
Harcanan Bütçe:	1670496.24
Öz:	<p>Gerçekleştirdiğimiz projede silisyum tabanlı polikristal-amorf silisyum ince film güneş gözesi üretimine özelleşmiş bir lazerle kristalizasyon platformunun sanayi-üniversite işbirliği sayesinde geliştirilmesi sağlanmıştır. Yola çıkış hedeflerimiz bu teknoloji ve üniversite araştırma olanakları kullanılarak ince film silisyum güneş gözesi üretilebileceğinin gösterilmesi ve üretim yöntem basamaklarının ortaya konmasıdır. Günümüz fotovoltaiik piyasasındaki en büyük pazar payı yaklaşık %90 ile kristal silisyum (c-Si) pul tabanlı gözelerle aittir. Ancak avantajlarına rağmen pul tabanlı Si göze teknolojisinin dünya enerji pazarındaki yeri halen sınırlıdır. Bu konudaki en büyük engellerden biri yüksek malzeme giderlerine bağlı üretim maliyetinin diğer enerji sektörleri ile rekabet edecek seviyede olmamasıdır. Aktif madde kullanımını optimize ederek üretim masraflarını düşürmeyi amaçlayan ince-film teknolojileri maliyet bariyerini aşarak fotovoltaiik enerji dönüşüm teknolojilerini diğer teknolojilerle rekabet edebilir hale getirecek bir çözüm potansiyeli vadetmektedir. İnce film poli-Si yaklaşımı ile tek kristal silisyuma yakın kalitede, mikrometre ölçeğinde tane büyüklüğüne sahip poli-Si ince filmlerin proje kapsamında büyütülmesi ve fotovoltaiik hücre üretiminde kullanılması hedeflenmiştir. Cam alttaşı üzerine elektron demet buharlaştırma yöntemi ile katkılanmış amorf silisyum tabakalar biriktirilerek ve kristalizasyon için özel olarak tasarlanıp geliştirilmiş lazer sisteminin çizgisel odağı bu yüzey üzerinde taranarak amorf silisyumun polikristal silisyuma kristalizasyonu sağlanmıştır. Üretilen polikristal silisyum yine katkılanmış ince bir amorf silisyum ile kaplanarak heteroeklem elde edilmiş, bu aygıtın üst ve alt kontakları Al termal buharlaştırılmasıyla oluşturularak aygıt üretimi tamamlanmıştır. Tüm üretim basamakları arasında optik, mekanik ve elektriksel ölçümler gerçekleştirilerek işlem basamakları iyileştirilmesi sağlanmış, gerektiği durumlarda lazer sisteminde de iyileştirmelere gidilmiştir. Verimliliklerde artış eldesi için kenar yalıtımı ve plazmonik yapıların entegrasyonu da gerçekleştirilmiştir. Üretilen polikristal Si malzemenin dinamiği moleküler dinamik sayısal benzetim yöntemiyle kuramsal olarak çalışılmıştır. Projemiz sonucunda çağrı programıyla uyumlu olarak göze üretiminde yerli üretim altyapısı oluşturmaya doğrudan katkı, geniş alanlı, düşük üretim maliyetli, polikristal-amorf silisyum heteroeklem ince film güneş gözesi üretilmesi, bu üretimi sağlayabilmek için fiber lazer teknolojisine dayanan yenilikçi, çok fonksiyonlu ve özgün bir ince film kristalizasyon ve işleme platformu prototipi geliştirilmesi başarılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	ince film güneş gözesi, fiber lazer, lazer kristalizasyonu, polikristal silisyum
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Improvement of Laser-Crystallized Silicon Film Quality via Intermediate Dielectric Layers on a Glass Substrate (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Laser Assisted Sculpting of Silicon (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı),